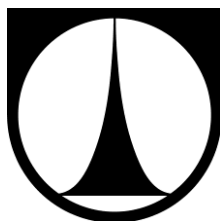




TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta strojní

Katedra materiálu



# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**VLIV UHLÍKOVÝCH VLÁKEN NA MECHANICKÉ  
VLASTNOSTI GEOPOLYMERŮ**

**EFFECT OF C-FIBRES ON MECHANICAL PROPERTIES OF  
GEOPOLYMERS**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**

Katedra materiálu

Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3911R018 Materiály a technologie  
Zaměření: Materiálové inženýrství

**VLIV UHLÍKOVÝCH VLÁKEN NA MECHANICKÉ  
VLASTNOSTI GEOPOLYMERŮ**

**EFFECT OF C-FIBRES ON MECHANICAL PROPERTIES OF  
GEOPOLYMERS**

KMT – B – 211

Duong Ngoc Phung

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Petr Louda, CSc.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Trinh Thi Linh

Rozsah práce:

Počet stran: 55

Počet obrázků: 33

Počet tabulek: 14

Počet grafů: 14

Počet příloh: 0

Květen 2013

# **OFICIÁLNÍ ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

## *Prohlášení*

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL práva ode mne požadovat úhradu nákladů, které poskytla na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultatem.

V Liberci, dne 24.5.2013

Podpis.....

## **Poděkování**

Chtěl bych na tomto místě poděkovat vedoucímu bakalářské práce: panu prof. Ing. Petr Loudovi, CSc., vedoucímu bakalářské práce za pomoc při vypracování práce a zároveň odborné konzultantce (vedoucí práce po stránce praktické): paní Ing. Trinh Thi Linh za odborné konzultace, ochotu, trpělivost a cenné rady při psaní této práce. Dále děkuji paní doc. Ing. Doře Kroisové, Ph.D a Ing. Kovačičovi za pomoc při jejím vypracování. Také bych chtěl poděkovat mé rodině a přátelům za podporu během studia.

## ANOTACE

Geopolymery jsou pro výzkum velmi zajímavé pro svou vysokou odolnost proti ohni, nízkou hustotu, nízké náklady nízkou sušicí a vytvrzovací teplotu, snadnou přípravu, výborné mechanické vlastnosti, environmentální neškodnost, dlouhodobou stálost, fixaci kovových iontů a odolnost v kyselinách.

V této bakalářské práci byla geopolymerní matrice syntetizována s Si/Al 2,0 mol, hydroxidem sodným (NaOH) a křemičitanem sodným ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Byla zkoumána tvrdost, pevnost v tlaku, hustota geopolymery s přidavkem C-vláken s obsahem 1%, 3%, 5%, 7%, 8%, a 10% hmotnostních a dále v různých časech sušení: při teplotě místnosti, 60°C, 100°C, 200°C, 300°C, 600°C a 800°C.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Kompozit, geopolymery, uhlíkové vlákno, cement, alkalická aktivace, umělý kámen, pevnost v tlaku.

## ANOTATION

Geopolymers have attracted the interest of scientists due to their excellent fire resistance, low density, low cost, low curing/hardening temperatures, easy processing, excellent mechanical properties, environmentally friendly nature, long-term durability, heavy metal ions fixation and acid resistance. In this experiment, geopolymer resin was synthesized with Si/Al molar ratio of 2.0 with sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). The hardness, compressive strength, density of geopolymer adding C-fiber with 1%, 3%, 5%, 7%, 8%, 10% in weight were observed in different curing time at room temperature, 60°C, 100°C, 200°C, 300°C, 600°C, 800°C.

## KEYWORDS

Composit, geopolymer, carbon fiber, concrete, alkali activation, synthetic rock, compressive strength.

# OBSAH

<b>1.</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>9</b>
<b>2.</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST</b>	<b>10</b>
<b>2.1</b>	<b>Kompozity</b>	<b>10</b>
2.1.1	Kompozitní materiály	10
2.1.2	Obecné vlastnosti kompozitů	10
2.1.3	Praktické využití kompozitů	13
2.1.4	Rozdělení kompozitních materiálů	13
<b>2.2</b>	<b>Pojiva</b>	<b>16</b>
2.2.1	Rozdělení pojiv	16
2.2.2	Geopolymery	17
2.2.2.1	<i>Co jsou geopolymery ?</i>	17
2.2.2.2	<i>Obecné vlastnosti geopolymerních kompozitů</i>	18
2.2.2.3	<i>Mechanismus alkalické aktivace a struktura geopolymery</i>	18
2.2.2.4	<i>Složení geopolymery</i>	19
2.2.2.5	<i>Příprava geopolymery</i>	19
<b>2.3</b>	<b>Plniva</b>	<b>20</b>
2.3.1	Co jsou plniva ?	20
2.3.1.1	<i>Pojem plnivo</i>	20
2.3.1.2	<i>Rozdělení výztuže a vlastnosti výztuže</i>	20
2.3.2	Vlivy plniva na vlastnosti kompozitů	22
<b>2.4</b>	<b>Matrice</b>	<b>26</b>
<b>2.5</b>	<b>Uhlíkové vlákno</b>	<b>26</b>
2.5.1	Hlavní druhy běžně vyráběných vláken	27
2.5.2	Vlákna s vynikajícími vlastnostmi	27
<b>2.6</b>	<b>Alkalické aktivátory</b>	<b>27</b>
2.6.1	Co jsou alkalické aktivátory ?	27
2.6.2	Materiály vhodné pro alkalickou aktivaci	28
<b>2.7</b>	<b>Vliv teploty</b>	<b>29</b>
<b>3.</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b>	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>Volba chemického složení vzorků a příprava zkušebních směsí</b>	<b>30</b>
3.1.1	Použité suroviny	30
3.1.2	Příprava zkušebních směsí	31
<b>3.2</b>	<b>Sledování zpracovatelských vlastností při pravených směsí</b>	<b>33</b>
3.2.1	Příprava směsí pro vzorky	33
3.2.2	Postup přípravy zkušebních vzorků	34
<b>3.3</b>	<b>Použité formy a jejich užití</b>	<b>34</b>
<b>3.4</b>	<b>Elektrická pec</b>	<b>35</b>
<b>3.5</b>	<b>Výsledky experimentů</b>	<b>35</b>
3.5.1	Pevnost v tlaku	35
3.5.2	Použitá metoda pro stanovení tvrdosti vzorových povrchu	39
3.5.3	Pozorování mikrostruktury	39
3.5.4	Výsledky	43
3.5.5	Diskuze výsledků	56
<b>4.</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>57</b>
<b>5.</b>	<b>SEZNAM LITERATURY</b>	<b>59</b>

## Seznam použitých veličin

$l_0, L_0$	Počáteční délka.	[mm], [ $\mu\text{m}$ ]
$l, L$	Konečná délka.	[mm], [ $\mu\text{m}$ ]
$h$	Výška.	[mm]
$\varepsilon$	Relativní deformace.	[-]
$\sigma$	Napětí.	[N/mm <sup>2</sup> ], [MPa]
$D, d$	Průměr.	[mm], [ $\mu\text{m}$ ]
$R, r$	Poloměr.	[mm], [ $\mu\text{m}$ ]
$E$	Youngův modul pružnosti.	[GPa]
$F$	Síla.	[N]
$S$	Průřez.	[mm <sup>2</sup> ]
$T$	Teplota.	[°C]
$R_m$	Mez pevnost.	[MPa]
$V$	Objem.	[cm <sup>3</sup> ]
$F$	Koeficient tření.	[-]
$\rho$	Hustota.	[g/cm <sup>3</sup> ]
$m$	Hmotnost.	[g]
$\Delta L$	Absolutní deformace.	[mm]

## Seznam použitých symbolů

RTG	Rentgen.	Záření X.
UV	Radiation UV.	Záření UV.
AS	Average strength.	Průměrná pevnost.
HS	High strength.	Vysoká pevnost.
HT	High tenacity.	Vysoký modul pružnost.
HM	High Modulus.	Vysoký modul.
IM	Intermediate Modulus.	Střední modul.
UHM	Ultra High Modulus.	Maximální vysoký modul.
VHM	Very High Modulus.	Velmi vysoký modul.
SBCF	Stretch-Broken Carbon Fiber.	Porušená tahem.



## 1. ÚVOD

Současný výzkum v některých oborech prokazuje, že výsledky vznikaly za použití kompozitů na bázi alkalicky aktivovaných pojiv nebo-li geopolymérů. Tyto materiály se historicky používaly především pro tvorbu stavebních dílů a vyznačovaly se vyjímečnými vlastnostmi co do pevnosti a trvanlivosti.

Použití těchto materiálů nabízí široké možnosti modifikace jejich vzhledu a struktury. Přidávky různých aditiv (plniva, pigmenty, barviva, aj.) lze imitovat různé typy minerálních materiálů, které se uplatňují na historických památkách.

Při použití anorganických plniv do geopolymérů slouží k zlepšování jejich vlastností. Mezi vlastnostmi, které se nejvíce mění, patří modul pružnosti  $E$ , pevnost v tahu – v tlaku  $\sigma$ , propustnost pro plyny, transparentnost a termická odolnost.

Geopolymery se vyznačují trojrozměrnou amorfní mikrostrukturou. Právě jejich struktura umožňuje přidávání plniva v rozměrech nanometrů, které slouží k přípravě nanokompozitů.

Jednou z nejvýznamnějších vlastností geopolymérů je schopnost přijímat do své krystalické struktury velké anorganické molekuly nebo velké komplexní ionty.

## **2. TEORETICKÁ ČÁST**

### **2.1 Kompozity**

#### **2.1.1 Kompozitní materiály**

V současné době se kompozitní materiály používají jako průmyslové materiály ve všech oborech (především v leteckém, kosmickém a automobilovém průmyslu, ve vojenských aplikacích, u sportovních potřeb, v elektronickém i spotřebním oboru). V konstrukčním použití kompozitů se využívá hlavně jejich velké pevnosti a tuhosti. [1]

Kompozit je heterogenní materiál má vlastnosti odlišné od těch, které by se daly předpokládat prostým součtem vlastností těchto složek. Pro kompozity by tak bylo výstižnější označení “synergické materiály”, což by nejlépe vystihovalo jejich podstatu. Synergický výsledek působení pevných a tuhých vláken s poddajnou nebo křehkou kovovou, polymerní nebo keramickou maticí tak umožňuje konstruovat kompozity s vlastnostmi, jako je vysoká pevnost, tuhost a houževnatost, kterých by se nedalo dosáhnout u tradičních jednosložkových (monolitních) materiálů. [2]

Nežádoucí je vznik chemické reakce mezi maticí a povrchem výztuže, protože vede k narušení výztuže a ke vzniku křehkých fází, které oslabují pevnost adhezních vazeb. [2,3]

Kompozitní materiály jsou tedy charakteristické tím, že jsou složeny ze dvou a více složek (fází), které se liší svými chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Matrice, která zastává funkci pojiva je spojitá a obvykle poddavnější, nese v sobě tvrdší, tužší a pevnější nespojitou složku, která se nazývá výztuž (plnivo). Aby mohl být zařazen vícesložkový materiál mezi kompozitní musí být podle současného chápání pojmu kompozit splněny uvedené podmínky:

- podíl výztuže musí být větší než 5%.
- výztuž a matrice se liší ve svých (mechanických, fyzikálních a chemických) vlastnostech, výztuž je podstatně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice. V porovnání s maticí má výztuž obvykle výrazně vyšší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost atd.) a hlavním cílem vyztužení je tedy zlepšení uvedených vlastností.
- kompozit musí být připraven smícháním jednotlivých složek. [4]

#### **2.1.2 Obecné vlastnosti kompozitů**

Vlastnosti kompozitů jsou dány kombinací objemových podílů vyztužujících komponent s vysokou pevností, tuhostí a matic s nižším modulem. Vlastnosti kompozitů jsou funkcí vlastností složek, jejich relativních množství, stejně tak jsou funkcí geometrie nespojité fáze (tj. tvaru a rozměrů, distribuce a orientace). [5]

U klasických kompozitů s dlouhými vlákny se jako vyztužující mechanismus uplatňuje přenos napětí z matrice do výztuže. Podmínkou přenosu je optimálně 2x větší modul pružnosti vláken a existence dostatečně silné vazby s matricí. Snahou je zvýšit jejich odolnost proti porušení prostřednictvím mechanismů zvyšujících houževnatost. Většina těchto mechanismů využívá vlastností rozhraní mezi vláknem a matricí). [5]

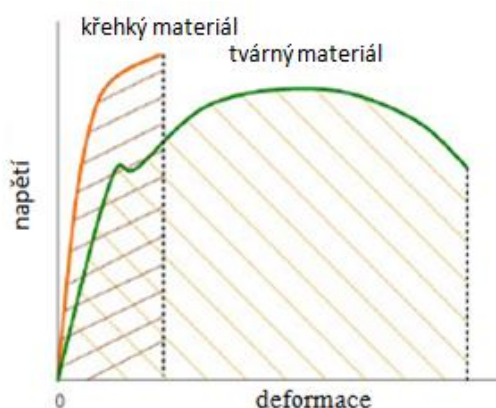
Mezi základní mechanické vlastnosti kompozitních materiálů vyztužených dlouhými vlákny patří pevnost, lomová houževnatost a teplotní stabilita). [5]

#### a) Pevnost v tahu

Nejběžnějším testem pro určení vlastností kompozitních materiálů je zkouška tahem. Slouží k stanovení modulu pružnosti a pevnosti a deformačních charakteristik jako je tažnost. Zkoušku lze provádět při různých podmínkách deformací a teplot.

Tahová křivka znázorňuje průběh odezvy napětí ve vzorku na deformaci (prodloužení) vyvolanou dynamometrem – viz. obr. 1

Na ose x je znázorněna deformace, kterou působíme na namáhaný materiál, na ose y se nachází síla, která je odezvou namáhaného materiálu.

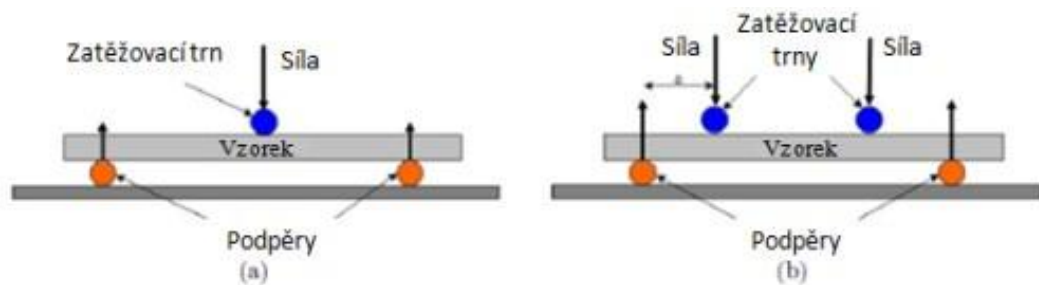


Obr. 1 Závislost napětí na deformaci pro křehké (oranžově) a tvárné materiály (zeleně). [5]

#### b) Pevnost v ohybu

Rozlišujeme dva druhy zkoušek stanovících pevnost v ohybu, a to třibodový a čtyřbodový ohyb – (viz. obr.2)

Při třibodové zkoušce je těleso podepřeno dvěma podpěrami a prohýbáno uprostřed ležícím protilehlým členem tak dlouho, dokud se těleso nezlomí nebo deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty. Zatěžující síla je vyvozována v polovině vzdálenosti podpor. Při čtyřbodové zkoušce působí na těleso dva zatěžující elementy, které jsou umístěny ve čtvrtině a třech čtvrtinách vzdálenosti podpěrných trnů. Hodnoty pevností v ohybu jsou u této metody nižší, ale používá se častěji. Důvodem je rovnoměrné zatížení (průběh rozložení napětí) v celé délce zkušebního tělesa mezi zatěžovacími trny). [5]

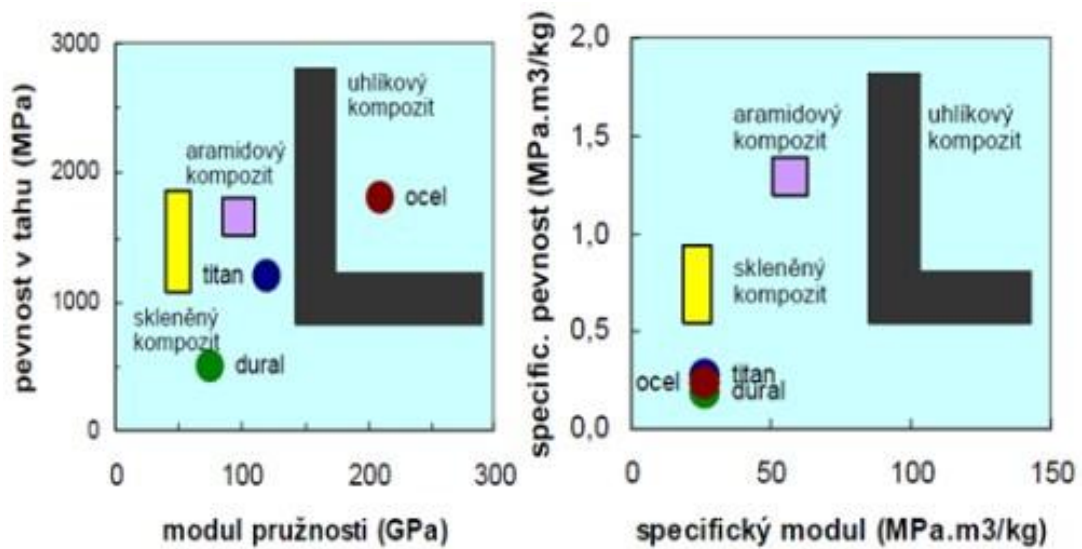


Obr. 2 Ohybový test (a) tříbodový ohyb, (b) čtyřbodový ohyb). [ 5]

c) **Kompozitní materiály se vyznačují následujícími vlastnostmi**

- Nízká specifická hmotnost (až 20% hmotnosti oceli).
- Nízká hodnota momentu setrvačnosti.
- Vysoká tuhost.
- Téměř nulová tepelná roztažnost.
- Vysoká korozní odolnost.
- Nemagnetičnost a propustnost RTG paprsků.

(Obr. 3) ukazuje vztah mezi pevností a tuhostí (modulem pružnosti) u tradičních kovových materiálů a kompozitů. Oblasti vlastností uhlíkových kompozitů jsou vzhledem ke kovům širší protože lze kombinovat vlákna o různých vlastnostech, např. u uhlíkových kompozitů lze dle potřeby použít buď vlákna o vysokém modulu pružnosti, nebo vlákna s vysokou pevností. [6]



Obr. 3 Porovnání mechanických vlastností materiálů. [6]

### 2.1.3 Praktické využití kompozitů

Kompozitní materiály představují jedno z nejúčinnějších využití potenciálních možností hmoty, a tím maximalizaci energetických úspor nejen z hlediska materiálu, ale i z hlediska využívání konstrukce. [7]

Např. použití kompozitních materiálů s velkou odolností proti korozi umožňuje prodloužit životnost konstrukcí i ve velmi agresivních prostředích a snížit tak náklady na jejich údržbu na minimum. [8]

O největší pokrok v konstrukčním využití kompozitů (převážně vláknového typu) se zasloužil letecký, kosmický, automobilový průmysl a stavebnictví. [7]

#### ▪ Příklady aplikací

- Stavebnictví (pláště budov, okenní rámy, pracovní a obslužné plošiny, stavby pro rozvod energie, nástavby na výškové budovy).
- Nákladní doprava (kontejnery, nákladní návěsy, ramena hydraulických zvedáků, výsuvné plošiny, přívěsy za nákladní i osobní automobily).
- Výroba prostředků pozemní hromadné dopravy (interiéry kolejových vozidel, součásti karosérií kolejových vozidel, autobusy).
- Výroba osobních automobilů.
- Letecký a kosmický průmysl.
- Výroba vojenské techniky.
- Rozvod elektrické energie (rozvaděče, izolátory, sloupy elektrického osvětlení, manipulační tyče).
- Výroba sportovních potřeb (golfové hole, hokejky).
- Oblast reklamy (billboardy). [8]

### 2.1.4 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozity je možné členit podle několika různých hledisek:

a) **Jedním z klasifikačních kritérií mohou být rozměry vyztužující fáze, podle kterých se dělí kompozity na makro-, mikro- a nanokompozity.**

#### • Makrokompozity

Makrokompozity jsou soustavy, které obsahují výztuž o velikosti příčného rozměru  $10^0$  až  $10^2$  mm a jsou používány především ve stavebnictví (železobeton, polymerbeton aj.)

#### • Mikrokompozity

Mikrokompozity mají výztuž, jejichž největší příčný rozměr je v rozmezí  $10^0$  až  $10^2$   $\mu\text{m}$ . Na rozdíl od kovů a jejich slitin mají menší hustotu a tedy příznivý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě, tzn., že dosahují velké měrné pevnosti ( $\sigma_{\text{pt}}/\rho$ ) a měrného modulu ( $E/\rho$ ).

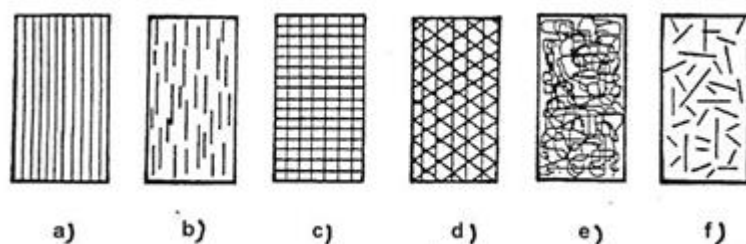
- Nanokompozity

Nanokompozity jsou soustavy, kde u výztuže aspoň jeden rozměr spadá do oblasti nanometrů ( $10^{-9}\text{m}$ ), do této skupiny patří především speciálně organicky upravené jíly (hlinitokřemičitanové nanodestičky deskovitého tvaru). Dva rozměry v nanometrech mají zejména uhlíkové nanotrubičky a nanovlákna, všechny tři rozměry silika nebo siloxany (izodimenzionální částice kulovitěho tvaru). Nanoplňiva se vyznačují mimořádně vysokým zpevňujícím efektem při minimálním obsahu výztuže. Účinného zlepšení vlastností se dosahuje zvláště u plastů a to především zvýšení tepelné odolnosti, pevnosti, tuhosti a odolnosti proti hoření. Již obsah 3% částicové výztuže v rozměrech  $10^{-9}\text{m}$  zvyšuje odolnost proti tepelné deformaci na úroveň srovnatelnou s polymerem, který obsahuje 20 až 30% standardních minerálních plniv, pevnost v tahu je u takového kompozitu až o 50% vyšší. [4,2]

**b) Rozdělení podle geometrického tvaru výztuže (nosné části), plniva**

- Vláknové
- Částicové
- Skeletové

Charakteristické typy vláknových kompozitů jsou graficky znázorněny na obr.4

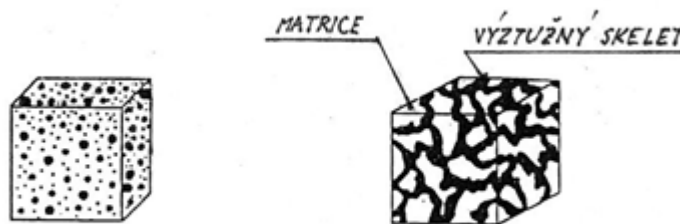


*Obr. 4 Typy vláknových kompozitů. [9]*

- a) Jednosměrná dlouhá vlákna.
- b) Jednosměrná krátká vlákna.
- c) Dvousměrné vyztužení (křížová tkanina).
- d) Vícesměrné vyztužení.
- e) Náhodná orientace vláken.
- f) Náhodná orientace krátkých vláken. [9]

U částicových kompozitních materiálů (viz. obr.5) jsou vyztužující částice dispergovány v matici a omezují rozvoj plastických deformací, čímž zvyšují mez kluzu, mez pevnosti, tvrdost a samozřejmě ovlivňují celou řadu dalších vlastností. [9]

Skeletový kompozitní materiál (viz. obr.5) je tvořen pórovitou maticí prostoupenou souvislým nosným skeletem. [9]



Obr. 5 Částicový a skeletový kompozitní materiál. [9]

**c) Kompozity lze dále rozdělit podle materiálu výztuže (plniva)**

- Kovy (W, Fe, Cr, Mo, Ti, Ni a jejich slitiny).
- Nekovové materiály:
  - Anorganické materiály: keramické materiály ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ , SiC, TiC), skla (E, S), C, B, čedič.
  - Organické materiály: polymery (aramidová vlákna - Kevlar, polyamidová vlákna - Nylon). [9]

**d) Kompozity lze rozdělit také podle materiálu matrice**

- Kovy (Al, Ag, Fe, Mg, Ti, Co, Cu, Ni a jejich slitiny).
- Nekovové materiály:
  - Anorganické materiály: keramické materiály ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC,  $\text{SiO}_2$ , TiC), skla (E, S), C.
  - Organické materiály: polymery (polyestery, fenolické pryskyřice, epoxidy, polyamidy). [9]

Kompozit může být typu kov-kov, polymer-polymer, keramika-keramika, keramika-kov, keramika-polymer, apod. Samozřejmým předpokladem je však dobrá mezifázová adheze a vhodné deformačně-napěťové vlastnosti. Jako zajímavost lze uvést, že existují kompozity, u kterých je materiál výztuže stejný, pouze v jiné formě. [9]

**e) Rozdělení kompozitů podle použití**

Korozivzdorné, žárupevné, žáruvzdorné, aplikace v letectví, strojírenských výrobních technologiích, stavebnictví. [9]

Především se budeme zabývat vláknovými konstrukčními kompozitními materiály. Podrobnější rozdělení těchto kompozitů z hlediska geometrického uspořádání vláken je uvedena na obr.6



Obr. 6 Vláknové kompozity z geometrického pohledu. [9]

## 2.2 Pojiva

### 2.2.1 Rozdělení pojiv

Podle typu pojiva dělíme směsi pro přípravu kompozitních materiálů do dvou základních skupin: Skupina směsí s organickým a anorganickým pojivem.

#### a) Skupina směsí s anorganickým pojivem

Mezi anorganická pojiva patří především pojiva hydraulická: cement, hydraulická vápna, románský cement a v menší míře i sádra. U směsí pojených bílým cementem byl optimální poměr stanoven na 1:4 (pojivo : plnivo). Zde hraje značnou roli i množství použité záměsové vody. Optimální množství se pohybuje kolem 9 hm%. [10]

##### ▪ Výhody

Přítomnost vody v systému, zpracovatelnost i při teplotách blízcích se 0°C. Anorganické materiály jsou méně odolné kyselému prostředí. [10]

##### ▪ Nevýhody

Přítomnost velkého množství alkálií a s tím související nebezpečí výkvětů vodorozpustných solí. [10]



## **b) Skupina směsí s organickým pojivem**

Dominantním materiálem mezi organickými pojivy jsou epoxidové pryskyřice.

### ▪ Výhody

Výborná adheze k podkladu, dobrá odolnost vůči kyselému prostředí, krátká doba potřebná k dosažení konečné pevnosti. [10]

### ▪ Nevýhody

Optimální teplota vytvrzovací reakce kolem 15°C. Vytvrzování je zpomalováno případně zastaveno přítomností vlhkosti. To hraje roli například při výběru plniva, kdy nelze použít vlhký přírodní písek. To neplatí pro epoxidy ve vodných emulzích. Běžné epoxidové pryskyřice jsou náchylné k degradaci UV zářením. V neposlední řadě je třeba připomenout nutnost přesného dodržení technologie přípravy směsi a vyšší cenu oproti běžným anorganickým pojivům. [10]

## **2.2.2 Geopolymery**

➤ *Seznámení se s vlastnostmi geopolymérů a geopolymerních kompozitů.*

### **2.2.2.1 Co jsou geopolymery ?**

#### **a) Pojem geopolymér**

Geopolymery (anorganické pojivo), občas nazývané anorganické pryskyřice nebo-li alkalicky aktivované pojivo. Geopolymery patří do skupiny alkalicky aktivovaných materiálů, které jsou na rozhraní mezi klasickými hydratovanými anorganickými pojivy – cementy, skelnými a keramickými materiály a hydraulickými vápny. Termín geopolymér byl použit poprvé v roce 1979, kdy byl tento typ materiálů patentován Prof. Davidovitsem, který poprvé popsal geopolymér jako materiál, kde základní aktivovanou složkou je metakaolin, který se připravil kalcinací s různými typy vápenců. [10]

Obecně pod pojmem geopolymér dnes rozumíme amorfni hlinitokřemičitý materiál skládající se z tetraedrálních hlinitých a křemičitých jednotek kondenzujících při pokojové teplotě za vzniku rovnovážných struktur s přítomností jednomocného iontu alkalického kovu. Svým chemickým složením se tak tyto materiály velmi podobají zeolitům. [10]

#### **b) Geopolymery představují nový typ materiálů – nová technologie pro stavebnictví**

Geopolymerní kompozity jsou vhodné pro použití ve stavebnictví, představují uplatnění architektury, ale také v dalších oborech, kde mohou nahrazovat použití kovů nebo umělých hmot na organické bázi.

#### **c) Suroviny pro přípravu geopolymérů**

Suroviny pro přípravu geopolymérů mohou být převážně látky odpadního charakteru, jako jsou elektrárenské popílků, strusky z metalurgických procesů a jiné anorganické odpady nebo přírodní materiály, jako jsou jíly, kaolíny, aj.

### 2.2.2.2 Obecné vlastnosti geopolymerních kompozitů

Nový obkladový materiál na bázi geopolymerního kompozitu, s minerálními vlákny a dalšími aditivy, vykazuje mimořádnou pevnost, odolnost proti ohni a slouží jako tepelná a zvuková izolace. Přidáním dalších nanomateriálů bylo docíleno nových vlastností jako například odstínění elektromagnetického a dalších druhů záření.

Geopolymerní kompozity jsou materiály s amorfní strukturou. Za vyšších teplot přechází amorfní struktura v mikrokrytalickou. [10]

Nejsou rozpustné ve vodě, nehoří ani nevytvářejí zplodiny, jsou odolné k teplotám kolem 1000°C, (na rozdíl od betonu, který se začíná rozpadat při teplotách nad 300°C), mají velmi nízkou teplotní vodivost, vysokou pevnost v tlaku (až 100 MPa), dobrou chemickou odolnost a minimální tepelnou roztažnost. Geopolymerní kompozity vykazují dobrou odolnost proti vlivu zředěných kyselin a zásad. Jejich výroba je ve srovnání s výrobou portlandského cementu výrazně méně náročná na energii a násobně šetrnější k životnímu prostředí. Jejich základní „báze“ je schopná akceptovat a uzavírat do polymerní sítě řadu dalších materiálů včetně materiálů druhotných. [10]

Geopolymerní pasty mají výbornou schopnost pojít velké množství plniva (až do 90% plniva ve směsi). Poměr pojiva a plniva ovlivňuje některé mechanické vlastnosti těchto kompozitů jako jsou např. pevnost a porozita.

### 2.2.2.3 Mechanismus alkalické aktivace a struktura geopolymery

#### a) Alkalická aktivace

Podmínkou pro alkalickou aktivaci je silně zásadité prostředí, aby mohlo dojít k rozkladu trojrozměrné struktury výchozího hlinitokřemičitanu za vzniku křemičitanových a hlinitanových aniontů. Geopolymerizaci vyvolává exotermní chemická reakce oxidů hliníku a křemíku s alkáliemi  $\text{Na}^+$  nebo  $\text{K}^+$  za vzniku polymerických vazeb  $\text{Si-O-Al}$ . Vznikající pevná látka anorganického polymeru je vytvořena ze soustavy sol-gel. Prekurzorem reakce je voda, která během reakčního procesu pomalu a postupně odchází. [10]

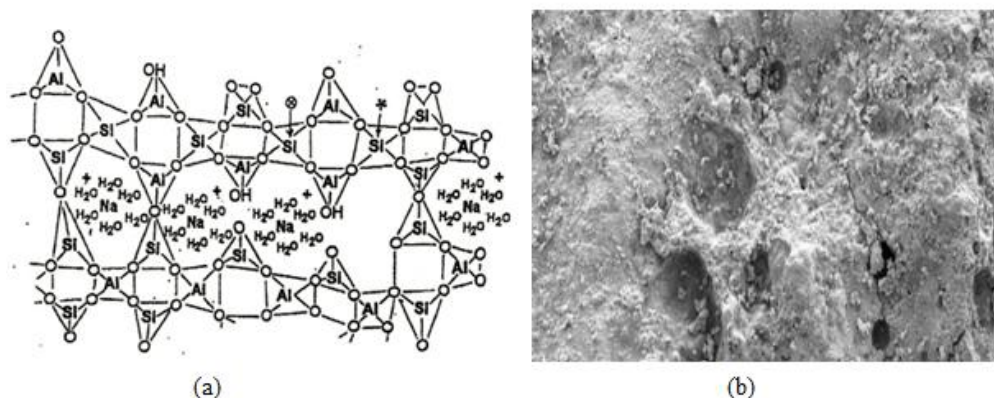
Alkalickou aktivací metakaolinu vzniká geopolymery typu  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$  obsahující jednotku sialát-siloxo  $[-\text{Si-O-Al-O-Si-O-}]$  případně sialát-disiloxo  $[-\text{Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-}]$ .

#### b) Struktura geopolymery

Pro chemické označení geopolymery byl navržen Prof. Davidovitem název (polysialáty), ve kterých sialát označuje zkratku pro oxid hlinitokřemičitanu. Sialát je složen z tetraedrálních aniontů  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  a  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  sdílejících kyslík, který potřebuje pozitivní ionty jako jsou  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$  ke kompenzaci elektrické šarže  $\text{Al}^{3+}$  v tetraedrál ní koordinaci. [10]

Obecný vzorec vzniklých polysialátů lze empirickým vzorcem vyjádřit následovně:  $\text{Me} [-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2]_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$ , kde  $n$  označuje stupeň polymerace, počet tetraedrických jednotek ( $z = 1, 2$  nebo  $3$ ).  $\text{Me}$  je alkalický kation, nejčastěji se jedná o kationy alkalických kovů jako jsou sodík nebo draslík tvořící různé typy polysialátů. [10]

Geopolymerní kompozity mají trojrozměrnou amorfní mikrostrukturu, v níž jsou silikátové a aluminátové tetraedry vzájemně nepravidelně vázány polykondensací přes kyslíkový můstek.



*Obr. 7 Struktura geopolymery*

- a) Struktura sodného geopolymerního kompozitu. [10]*
- b) Mikrostruktura geopolymery. [10]*

#### 2.2.2.4 Složení geopolymery

Hlavními složkami geopolymery jsou aktivovaná složka na bázi hlinitokřemičitanu a aktivátor.

#### 2.2.2.5 Příprava geopolymery

Názory na přípravu geopolymery se značně liší. V zásadě existují dva základní preferované postupy míchání geopolymery. První postup preferuje nejprve smíchat pevné složky směsi, aktivátor připravit odděleně a smícháním těchto dvou složek nakonec směs aktivovat. Druhý postup přípravy doporučuje obecně míchat směs v pořadí metakaolin, hydroxid, vodní sklo a strusku. [10]

Nezávisle na pořadí přidávání složek je pro správný průběh chemické reakce důležitá homogenizace. Příprava geopolymerních směsí se může značně lišit v závislosti na složení a vlastnostech aktivovaného materiálu. Obecně však můžeme říci, že chemická reakce, která probíhá při tvorbě geopolymery, probíhá v roztoku a tím je ovlivněn postup při přípravě těchto materiálu. V prvním kroku musí dojít k rozpuštění aktivované složky v silné alkálii (nejčastěji hydroxidech alkalických kovů), přičemž rozpouštění se provádí při normální teplotě. V druhém kroku se přidává vodní sklo o známém silikátovém modulu, aby byl dosažen obsah alkálií. Poté se přidávají ostatní složky – plniva, příměsi, které zlepšují zpracovatelské vlastnosti i mechanické charakteristiky výsledného materiálu. [10]

## 2.3 Plniva

- *Navržení vhodného typu plniva a na něm ověřit jeho vliv na vybrané mechanické vlastnosti kompozitů.*

### 2.3.1 Co jsou plniva ?

#### 2.3.1.1 Pojem plnivo

Plniva (vyztužující fáze) jsou přísady, které výrazným způsobem mohou ovlivnit výsledné vlastnosti směsi i výrobku. [11]

- Výhody

Výhodami vedoucími k použití tohoto plniva jsou podobnost plniva s přírodním materiálem, dosažení podobnosti některých fyzikálních a mechanických vlastností s přírodním materiálem.

- Nevýhody

Nevýhodou je složitost přípravy tohoto materiálu spočívající v drcení, mletí a následného prosívání na požadovanou frakci. Výsledný vzhled produktu je často více ovlivněn vlastnostmi pojiva, které často zastírají autentický charakter plniva.

V případě, že z nějakého důvodu nelze použít běžné plnivo, např. z důvodů vysokého statického zatížení originálu, lze použít lehčená plniva, mezi které patří především skleněné, keramické nebo polymerní mikrokuličky. Velmi příznivou vlastností je jejich snadná mísitelnost s polymerními pryskyřicemi i při velmi nízkém podílu pojiva ve směsi. Oproti této výhodě vystupuje v případě výhradního použití lehčených plniv esteticky neuspokojivý vzhled povrchu.

#### 2.3.1.2 Rozdělení výztuže a vlastnosti výztuže

Mohou být anorganické nebo organické povahy, může to být jeden prvek, přírodní materiál, směs různých materiálů (odpad a recykláty) nebo materiál specifického složení. Forma částic může být nepravidelného tvaru, kulovitá, prostorová, deskovitá, vločková, vláknová nebo směsí různých tvarů. Velikost částic od několika nanometrů po desítky milimetrů. [12]

Ve většině případů se jedná o tuhé látky používané ve formě prášku (základním tvarem je koule), tuhých vláken (základním tvarem je válec), nebo granulí a můžeme jimi plnit kaučuky, termoplasty i reaktoplasty. [11]

#### a) Rozdělení plniv

Podle geometrického tvaru rozdělujeme vyztužující fáze na:

- Částicové
- Vláknové

- Částicové (partikulární) výztuže

Jeden rozměr útvarů výztuže nepřesahuje výrazně rozměry ostatní. Částicové (partikulární) výztuže jsou prášky s částicemi různých tvarů (kulovité, jehlancovité, destičkovité, tyčinkovité i nepravidelný apod.) a velikosti. Většinou se jako částicová výztuž používají prášky anorganických sloučenin typu oxidů, nitridů, boridů a křemičitanů (kaolín, slída).

- Vláknové výztuže

Výztuž je v jednom směru výrazně rozměrnější, vláknové výztuže bývají vlákna kovová, polymerní, keramická, skleněná nebo vláknové monokrystaly (whiskery). Vlákna jsou podstatně pevnější než stejné kompaktní materiály a závisí především na jeho průřezu. Čím menší průřez, tím větší pevnost vlákna. Ve většině případů mají kruhový průřez o průměru od 10  $\mu\text{m}$  do 1 mm. [2]

U vláknových kompozitů jsou využívány vysoké mechanické vlastnosti vláken ve směru jejich osy: vysoká pevnost a modul pružnosti. Vlákna mají mnohem vyšší mechanické vlastnosti v porovnání se stejným, ale masivním materiálem. Příčinou je pokles velikosti strukturních defektů ve vláknech, orientace těchto defektů ve směru vláken a rovněž snížení celkové pravděpodobnosti výskytu defektů. [13]

- s krátkými vlákny - délka vláken výrazně menší v porovnání s velikostí daného výrobku. [13]
- s dlouhými vlákny - délka vláken srovnatelná s velikostí daného výrobku. [13]

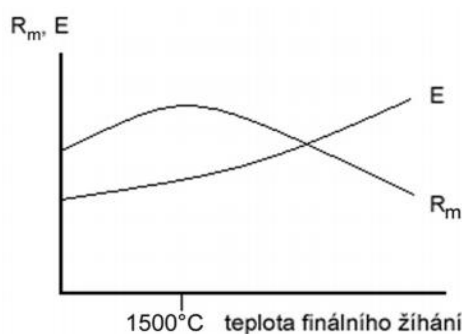
Různá uspořádání kontinuálních vláken, např. v jednom směru nebo vzájemně spletena do rohoží (laminát). [13]



Obr. 8 Rozdělení kompozitních materiálů. [13]

**b) Základním požadavkem plniva (vyztužující fáze)**

Základním požadavkem plniva (vyztužující fáze) je její vysoká pevnost a modul pružnosti (řádově vyšší než modul matrice) a malá deformace v lomu (1-2%) při vysokém podílu pružné deformace. Výztuž přenáší převážnou část vnějšího zatížení.

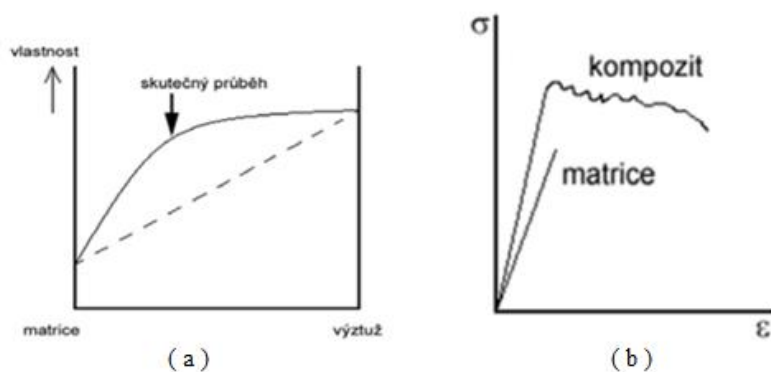


Obr. 9 Závislost mechanických vlastností uhlíkových vláken na teplotě žhání. [13]

### 2.3.2 Vlivy plniva na vlastnosti kompozitů

Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů jsou závislé na mechanických vlastnostech matrice a výztuže: typy plniva (nejčastěji se používá plnivo suché), velikost a distribuce výztuže, tvaru výztuže, soudržnost matrice a výztuže, koncentraci výztuže (objemový podíl) a orientaci výztuže (uspořádání výztuže). [13]

Velikost a distribuce částic se řídí texturou kompozitu a společně s objemovým podílem určují také mezifázový povrch, který má důležitou roli při určování rozsahu vzájemného působení mezi vyztužením a matricí na zpevnění. Koncentrace se udává se v objemovém nebo hmotnostním podílu a popisuje objem výztuže. Patří mezi nejvýznamnější parametry, které ovlivňují výsledné vlastnosti kompozitu. Izotropii systému ovlivňuje orientace plniva. Jsou-li vyztužující částice tvarově a rozměrově přibližně ve všech směrech stejné (prášky), chová se kompozit v podstatě jako izotropní materiál a jeho vlastnosti jsou nezávislé na směru. Naopak kompozity s vláknovou výztuží vykazují anizotropii vlastností.[2]



Obr. 10 Vlivy plniva na vlastnosti kompozitů. [13]

- a) Synergické chování složek kompozitu.
- b) Porovnání tahových diagramů křehké matrice a kompozitu složeného z této matrice a křehkých keramických vláken.

### a) Vlivy plniva na obecné vlastnosti kompozitů

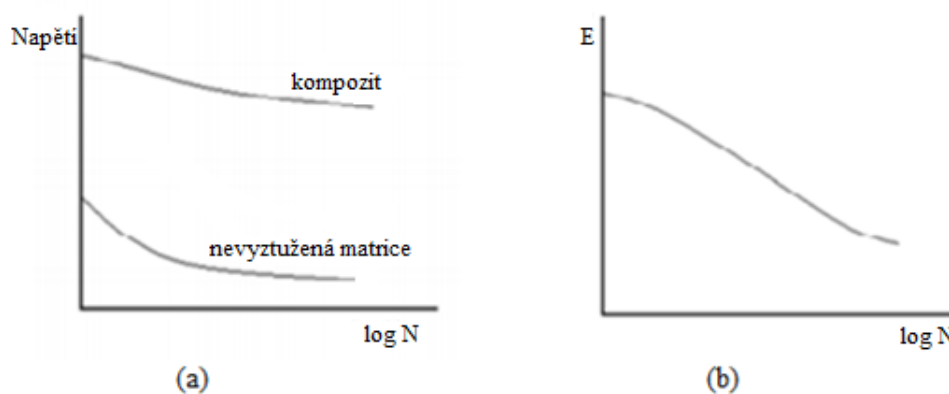
Nejdříve se plniva začala přidávat do kompozitu z důvodu snížení ceny. Plniva byla levná, proto i výsledný materiál mohl být výrazně levnější. Posléze snížení nákladů nebylo jediným důvodem pro použití plniv ale skutečnost, že plnivy lze výrazně ovlivnit vlastnosti kompozitu. Přidáním plniv do kompozitu lze snížit jejich hustotu, zlepšit mechanické vlastnosti výrobku (např. pevnost, houževnatost, odolnost proti oděru), ovlivnit optické, povrchové, elektrické vlastnosti, jeho odolnost vůči teplu, ohni, korozi, stárnutí. Je možno s nimi snížit smršťovitost tvaru a regulovat permeabilitu výrobků (folií). Mnohá plniva se používají k ovlivnění chemické reaktivity, materiálové životnosti nebo ke zvýšení účinnosti aditiv.

Stručně řečeno plnivo již neslouží jen ke snížení nákladů ale lze jimi měnit prakticky všechny vlastnosti materiálu se současným vlivem na výrobu, design a použití výrobků. Použitím plniv se značně rozšířila základna aplikací plastů.

### b) Vlivy plniva na vybrané mechanické vlastnosti kompozitů

#### ▪ Únava kompozitů

U kompozitů probíhá při únavovém poškození řada procesů – např. vznik lokálních mikrotrhlin v matrici nebo na rozhraní matrice a výztuže (delaminace), přetržení vláken vedoucí k porušení kontaktu mezi matricí a výztuhou, změny směru šíření trhlin podél vláken atd. Důležité však je, že tyto procesy neprobíhají na jednom místě, nýbrž difúzně v celém objemu kompozitu. Jejich průběh lze sledovat např. měřením změn modulu pružnosti  $E$  během cyklického namáhání  $N$ . [13]



Obr. 11 Únava kompozitů a modul pružnosti  $E$ . [13]

- Porovnání únavových křivek nevyztuženého materiálu a vyztuženého materiálu–vláknového kompozitu.
- Změny modulu pružnosti  $E$  vláknového kompozitu během únavového procesu.

## ▪ Modul pružnosti E a pevnost kompozitů

Výsledné elastické chování kompozitů závisí na tvaru výztuže a jejím rozložení v objemu kompozitu. Kromě mechanických vlastností matrice a vláken jsou vlastnosti výsledného kompozitu určeny rovněž objemovým podílem vláken a jejich uspořádáním. Pokud jsou vlákna uspořádána v jednom směru, pak nejvyšších mechanických vlastností dosahuje kompozit právě ve směru vláken. Požadujeme-li vysokou pevnost a tuhost ve dvou směrech, pak používáme struktury vyztužené vrstvami spletených vláken. Jsou-li žádoucí izotropní vlastnosti, pak lze aplikovat výztuž složenou z náhodně uspořádaných krátkých vláken. [13]

### - Kompozity s dlouhými vlákny

Známe-li moduly pružnosti matrice a vláken ( $E_M$ ,  $E_V$ ), pak pro modul pružnosti  $E_K$  kompozitu s dlouhými (kontinuálními) vlákny uspořádanými v jednom směru platí směšovací pravidlo:

$$E_K = E_V \cdot V_V + E_M \cdot V_M \quad (1)$$

kde: objemový podíl vláken  $V_V = 1 - V_M$ ,  $V_M$  je objemový podíl matrice a  $E_K$  je modul pružnosti ve směru shodném se směrem vláken. Vztah platí pouze pro ideálně dokonalou adhezi mezi matricí a vlákny a předpokládá se stejná deformace matrice a vláken. [13]

Druhým základním parametrem kompozitů je jejich pevnost  $R_{mK}$ . U kompozitů s kovovými matricemi, které jsou schopny poměrně velkých plastických deformací, se při lomu zpravidla porušují jako první vlákna. Napětí ve vláknech v okamžiku lomu je tedy rovno pevnosti vláken  $R_{mV}$ , napětí v matrici je však nižší než pevnost matrice  $R_{mM}$ . Důvodem je, že deformace matrice je shodná s deformací vláken i kompozitu, tj. je výrazně nižší než mezní deformace matrice. Napětí v matrici v okamžiku lomu kompozitu označme  $R_M$  a lze ho definovat jako napětí v matrici odpovídající kritické deformaci vláken. [13]

Pro pevnost kompozitu s dlouhými vlákny platí ve směru vláken směšovací pravidlo podobné vztahu (1):

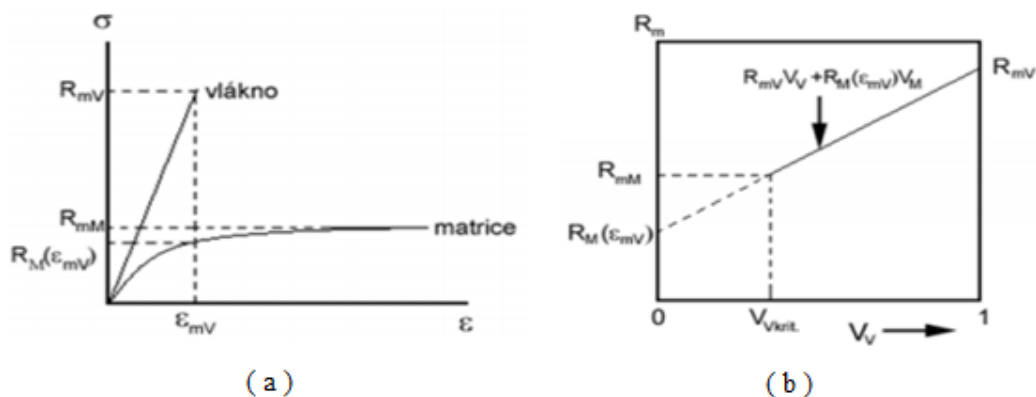
$$R_{mK} = R_{mV} \cdot V_V + R_M \cdot V_M \quad (2)$$

(Obr. 12), vidíme, že k tomu, aby došlo ke zvýšení pevnosti kompozitu oproti samotné matrici, je třeba určitého minimálního podílu vláken. Pokud je objemový podíl vláken příliš nízký, je jejich působení neúčinné, neboť při zatěžování dosáhne kompozit velmi rychle kritické deformace vláken. V takovém případě je pevnost kompozitu dána pouze pevností matrice. Minimální objemový podíl vláken vedoucí ke zpevnění matrice se nazývá kritický objemový podíl vláken  $V_{Vkrit}$  a lze ho vypočítat tak, že pravou stranu rovnice (2) položíme rovnu pevnosti matrice  $R_{mM}$ . Pro kritický objemový podíl vláken tedy platí:

$$\text{Pro kritický objemový podíl vláken tedy platí: } V_{Vkrit} = \frac{R_{mM} - R_M}{R_{mV} - R_M} \quad (3)$$

Ze vztahu (3) plyne, že kritický objemový podíl vláken je tím větší, čím je vyšší pevnost matrice a čím je nižší pevnost vláken. [13]





Obr. 12

- a) Tahové diagramy vlákna a kovové matrice, význam  $R_M(\varepsilon_{mv})$ . [13]  
 b) Závislost pevnosti kompozitu na objemovém podílu vláken  $V_V$ , význam  $V_{Vkrit}$ . [13]

- Kompozity s krátkými vlákny

U kompozitů s krátkými vlákny jsou tato vlákna často uspořádána náhodně. Jako hrubý odhad modulu pružnosti pro takové makroskopicky isotropní prostředí můžeme užít aritmetického průměru. [13]

$$E_K = \frac{E_{K1} + E_{K2}}{2} \quad (4)$$

U kompozitů s jednosměrně uspořádanými krátkými vlákny o délce  $L$  a průměru  $d$  je možno pro odhad modulu pružnosti kompozitu ve směru vláken  $E_K$  využít následujících vztahů:

$$E_K = E_M \frac{1 + \frac{2L}{d} \eta_L \cdot V_V}{1 - \eta_L \cdot V_V} \quad (5)$$

$$\eta_L = \frac{\frac{E_V}{E_M} - 1}{\frac{E_V}{E_M} + \frac{2L}{d}} \quad (6)$$

Výpočet pevnosti kompozitu s krátkými vlákny je složitější vzhledem k obecně komplikovanému průběhu napětí ve vláknech i v matrici. Za předpokladu ideálního elasto-plastického chování matrice s mezí kluzu ve smyku  $\tau_c$ , (maximální mezipovrchová adheze), existence tření mezi matricí a vláknem a volných konců (prasklého) vlákna můžeme použít schématu rovnováhy. [13]

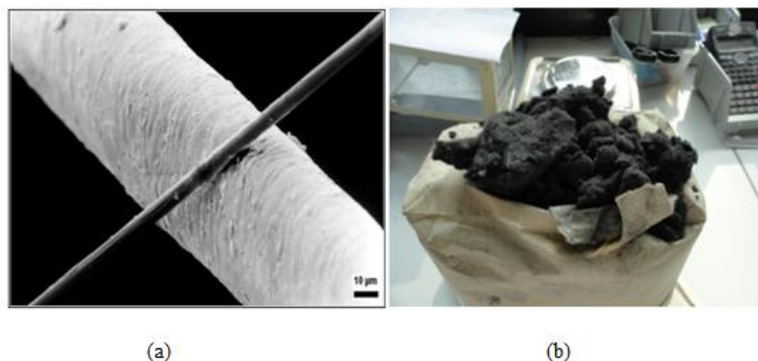
### c) Vlivy plniva na vybrané mechanické vlastnosti geopolymérů

Pro použití anorganických plniv do geopolymérů slouží k zlepšování vlastností geopolymérů. Výchozí myšlenkou pro použití anorganických plniv je předpoklad, že kompozitní materiály vykazují lepší užitkové vlastnosti než čistě homogenní materiály. Mezi vlastnostmi, které jsou nejvíce změněny, patří mechanické vlastnosti geopolymérů (modul pružnosti  $E$ , pevnost v tahu – tlaku  $\sigma$ , tažnost, rázová houževnatost, tvrdost, koeficient tření  $f$ , opotřebení), propustnost pro plyny, transparentnost, termická odolnost.

## 2.4 Matrice

Nejdůležitější funkcí matrice v kompozitu je přenos vnějšího zatížení na vyztužující fázi. Požaduje se dobrá soudržnost matrice s materiálem vyztužující fáze (dokonalá smáčivost bez chemické reakce na mezifázovém rozhraní matrice a výztuže) a často také její nízká hmotnost. Ve většině případech má zpravidla nižší pevnostní vlastnosti a větší plasticitu než výztuž. Chrání a spojuje jednotlivé částice výztuže před vnějšími vlivy a brání rozvoji křehkého porušení. K přípravě kompozitů lze použít materiály ze všech materiálových skupin - kovů, polymerů, keramiky, eventuálně jiných anorganických materiálů. Nejčastějším materiálem pro matrice jsou polymerní materiály, které mají ve srovnání s kovy nízkou měrnou hmotnost, vysokou měrnou pevnost, jsou korozně odolné, nevyžadují povrchové úpravy, tlumí kmity, mají nízkou tepelnou a elektrickou vodivost. Pro výrobu kompozitů se používají termoplasty, reaktoplasty i elastomery. Chemická odolnost a houževnatost je vyšší u termoplastů, zatímco pro elastomery je nejdůležitější vlastností tažnost. Modul pružnosti v tahu u termoplastu se pohybuje v rozmezí 1,5 až 3 GPa, u reaktoplastů 2,5 až 4,5 GPa a u elastomerů je velmi nízký 0,002 až 0,2 GPa. Pro výběr nejvhodnější polymerní matrice jsou určujícími faktory především jakému účelu bude kompozit sloužit, dále pak její tepelná a chemická odolnost, dostupná zpracovatelská technologie a v neposlední řadě také cena. [2]

## 2.5 Uhlíkové vlákno



*Obr.13 Uhlíkové vlákno.*

- a) Uhlíkové vlákno o průměru  $6\ \mu\text{m}$  v porovnání s lidským vlasem.
- b) Mletá uhlíková vlákna.

### 2.5.1 Hlavní druhy běžně vyráběných vláken

- Standardní karbonizovaná vlákna.
  - AS (average strength) - s průměrnou pevností.
  - HS (high strength) - s vysokou pevností.
  - HT (high tenacity) - s vysokým modulem pružnosti.
- Vysoko modulová grafitizovaná vlákna (HM – “High Modulus”).
- Vlákna vysoce pevná, se středním modulem pružnosti (IM – “Intermediate Modulus”).
- Dutá uhlíková vlákna.
- Vlákna s vysokým modulem pružnosti (VHM “Very High Modulus”, UHM “Ultra High Modulus”).
- Diskontinuální vlákna porušená tahem (SBCF, “Stretch-Broken Carbon Fiber”)
- Mletá uhlíková vlákna.
- Recyklovaná uhlíková vlákna.

### 2.5.2 Vlákna s vynikajícími vlastnostmi

Uhlíková vlákna poskytují nejširší spektrum mechanických vlastností polymerních kompozitů a to při malé hustotě. Vynikající mechanické vlastnosti uhlíkových vláken vyplývají z vysoce anizotropní hexagonální struktury, kterou se vyznačuje grafit, alotropní modifikace uhlíku. V bazálních hexagonálních rovinách grafitu jsou uhlíkové atomy mezi sebou vázány silnými kovalentními vazbami, zatímco mezi těmito rovinami působí slabé Van der Waalsovy síly. V uhlíkových vláknech jsou hexagonální roviny uhlíkových atomů více či méně dokonale orientovány ve směru osy vlákna, jejich vzájemné uspořádání vedle sebe však není tak pravidelné jako v hexagonálních krystalech grafitu. Vlastnosti uhlíkových vláken jsou závislé na míře orientace hexagonálních rovin do směru osy vlákna a míře uspořádání hexagonálních rovin mezi sebou. Struktura a vlastnosti uhlíkových vláken jsou dány technologií jejich výroby. V porovnání se skleněnými vlákny se uhlíková vlákna vyznačují vysokou anizotropií fyzikálních i mechanických vlastností. Koeficient lineární teplotní roztažnosti je ve směru vláken záporný, zatímco ve směru kolmém je kladný a má vysokou hodnotu. Uhlíková vlákna jsou oproti skleněným křehčí a mají nižší hustotu. Kromě kompozitů s polymerní maticí se uhlíková vlákna používají i pro kompozity s kovovou, keramickou a uhlíkovou maticí. Uhlíkových vláken se v současné době vyrábí velké množství, obvykle se dělí na nízkomodulová, středněmodulová a vysokomodulová, hranice ovšem nejsou určeny normou. [14]

## 2.6 Alkalické aktivátory

### 2.6.1 Co jsou alkalické aktivátory ?

Jako aktivátory se nejčastěji používají alkalické roztoky sodíku a draslíku – hydroxidy, uhličitany (soda nebo potaš) a vodní skla, a to samostatně nebo ve směsi. Kromě těchto látek lze pro alkalickou aktivaci použít např. síran či chlorid sodný, pro přípravu alkalicky aktivovaných cementů se využíval cement, vápno, síran nebo chlorid vápenatý.

Alkalický aktivátor je klíčovou složkou geopolymerní reakce, který zásadně ovlivňuje pevnost a vlastnosti vzniklého produktu. Množství aktivátoru je různé v závislosti od ostatních složek: např. pro sodný aktivátor se přidává takový obsah roztoku aktivátoru, aby se obsah  $\text{Na}_2\text{O}$  pohyboval v rozmezí 2 - 8%, resp. 3 - 10% pro  $\text{K}_2\text{O}$ . [10]

Podle dosud provedených výzkumů bylo zjištěno, že vyšších pevností se dosahuje ve směsích obsahující jako aktivátor vodní sklo samostatně nebo ve směsi s roztokem hydroxidu. Dalšího zvýšení pevnosti se dosáhne, pokud je vodní sklo použito ve formě koloidního roztoku, jehož tzv. silikátový modul by se měl pohybovat v rozmezí 1-2, přičemž mechanická pevnost vzrůstá se snižováním silikátového modulu, tj. vyšším obsahem alkálií v systému vodního skla.

Dalším faktorem ovlivňujícím pevnost alkalicky aktivovaných materiálů je koncentrace alkalického aktivátoru. S rostoucí koncentrací aktivátoru roste mechanická pevnost směsí. [10]

Kromě pevnosti ovlivňuje druh aktivátoru i tendenci vytvářet výkvěty vodorozpustných solí. Z tohoto hlediska jsou všeobecně stabilnější aktivátory na bázi draslíku než alkalické roztoky obsahující sodík. [10]

## 2.6.2 Materiály vhodné pro alkalickou aktivaci

Pro alkalickou aktivaci se používají křemičité nebo častěji hlinitokřemičité materiály, které se vyznačují latentními hydraulickými vlastnostmi. Do této skupiny patří materiály přírodního nebo syntetického původu, např. aktivované kaolinické hlíny, nejčastěji metakaolin, popílký, vysokopecní struska nebo jejich směsi. Jejich je ovlivněna chemickým a fázovým složením, měrným povrchem (jemností mletí) a mírou aktivace (např. u aktivity jílu rozhoduje teplota kalcinace).

Metakaolin - je vysoce reaktivní metastabilní jíl. Chemicky se jedná o vysoce reaktivní bezvodý hlinitokřemičitan, který se získává tepelnou úpravou (kalcinací) kaolinu a kaolinických jílu v rozmezí teplot 650 – 800°C. Reaktivita metakaolinu je závislá na kalcinační teplotě, která se pohybuje optimálně okolo hodnoty 700°C. Jedná se o materiál, který se díky své všeobecné dostupnosti pro přípravu geopolymerních systémů využívá nejčastěji. [10]

Popílký - z chemického hlediska se jedná o heterogenní materiály, které se skládají z více komponent o rozdílném chemickém, fyzikálním a mineralogickém složení. Základní složkou je oxid křemičitý, která tvoří cca 70% celkového složení. Popílký vznikají při spalování pevných paliv (např. černého a hnědého uhlí) v elektrárnách, podle způsobu spalování rozlišujeme popílký vysokoteplotní a fluidní.

Vysokopecní struska - je vedlejším produktem termických a spalovacích procesů. Strusky sestávají převážně z  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  s příměsí sloučenin síry, fosforu a kovů. Podle původu vzniku je dělíme na strusky vysokopecní, ocelářské a slévárenské. Mnohé strusky, zejména strusky ocelářské, slévárenské a strusky z výroby neželezných kovů, mají vysoký obsah sloučenin kovů.

Vulkanická struska - vzniká při vulkanické erupci, kdy je část lávy působením okolní atmosféry a vodní páry oxidována a rozpadá se na vulkanickou strusku téměř šedé až černé barvy s vysokým obsahem železa. [10]

## **2.7 Vliv teploty**

Faktorem ovlivňujícím mechanickou pevnost je teplota. Zvýšená teplota způsobuje rychlejší tvrdnutí geopolymerních směsí ve srovnání s tuhnutím při laboratorní teplotě. [10]

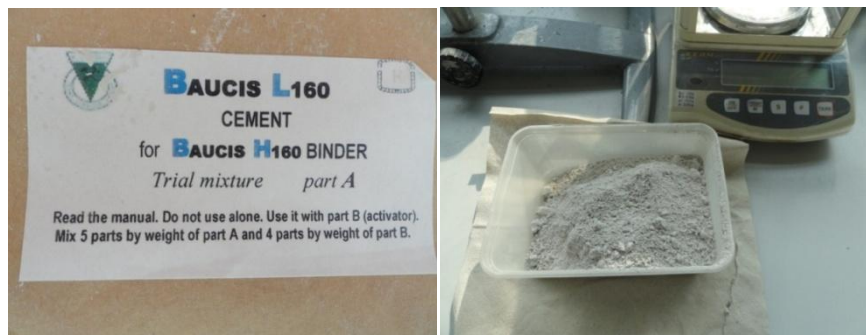
### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 3.1 Volba chemického složení vzorků a příprava zkušebních směsí

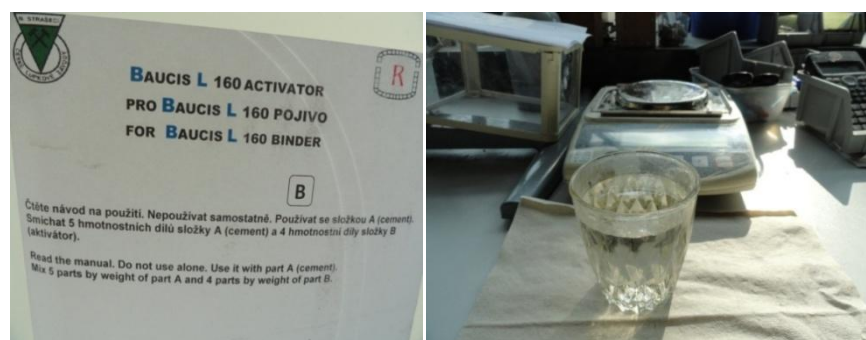
##### 3.1.1 Použité suroviny

###### a) Pojivová složka

Jako pojivová složka byl použit BAUCIS L160 cement - složka A (viz. obr.14) s aktivátorem - složka B (viz. obr.15), jak je uvedeno na obr.17



*Obr. 14 Složka Baucis L 160 cement.*



*Obr.15 Alkalický aktivátor Baucis L 160.*

###### b) Plnivo

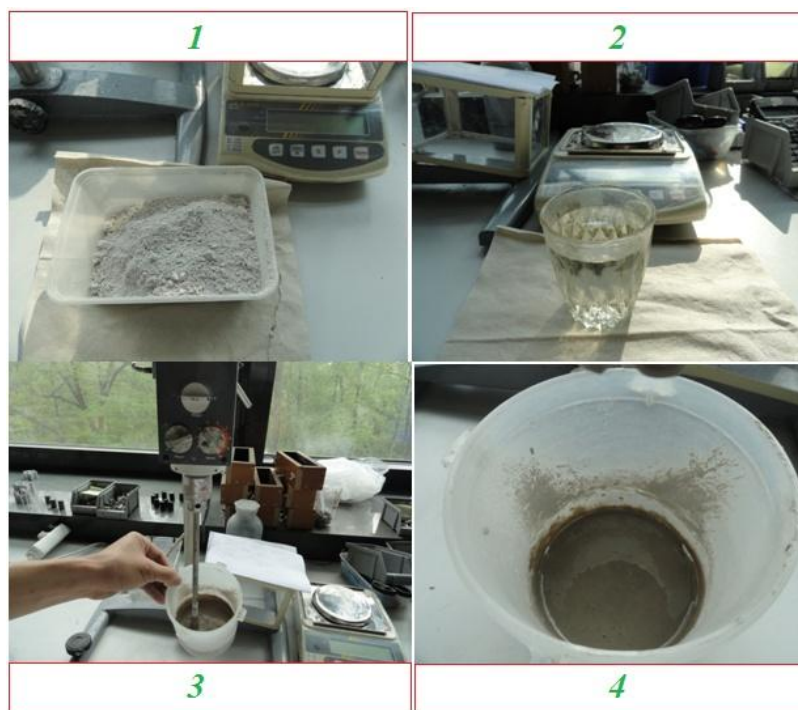


*Obr. 16 Jako plnivo byla použita mletá uhlíková vlákna.*

### 3.1.2 Příprava zkušebních směsí

#### a) Postup přípravy geopolymerních směsí

Geopolymerní pojivo (4) se skládalo ze dvou složek – první složku tvořil CEMENT (1), který byl smíchán s roztokem silné alkálie označované jako AKTIVÁTOR (2)



Obr. 17 Postup přípravy geopolymerních směsí.

Cement byl nejprve míchán za pomalých otáček, s postupným přidavkem složky CEMENT (1) se otáčky zvyšovaly. Poté byl CEMENT (1) po dobu pěti minut míchána homogenizován s AKTIVÁTOREM (2)

▪ V experimentální části práce bylo použito jediného geopolymerního pojiva [směs CEMENT (1) a AKTIVÁTOREM (2)] s normálním hmotnostním podílem:

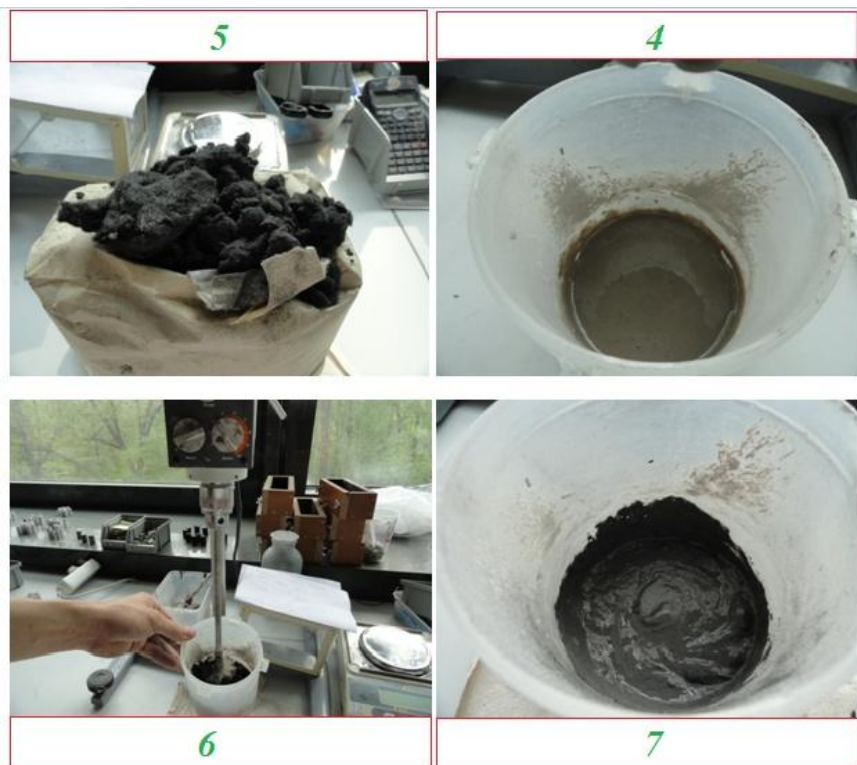
- Pro přípravu geopolymerních kompozitů s obsahem uhlíkových vláken: 1%, 3%, 5%, 7%, 8%, 10%.

- Míchání s normálním hmotnostním podílem 
$$\frac{\text{CEMENT}}{\text{AKTIVÁTOR}} = \frac{5}{4} \quad (7)$$



#### b) Postup přípravy geopolymerních kompozitních směsí

- Michání geopolymerního pojiva (4) a uhlíkových vláken (5) s různými obsahem uhlíkových vláken: 1%, 3%, 5%, 7%, 8%, 10% (viz. obr.18)
- Uhlíková vlákna (5) byly přidávány postupně do geopolymerního pojiva (4) za 10 minut míchány.
- Ten byl nejprve míchán za pomalých otáček, s postupným přidavkem plniva za zvýšených otáček pro zlepšení zpracovatelských vlastností.
- Poté byla geopolymerních kompozitních směs (7) ve formách (8) vibrována na vibračním stolku po dobu 2 minut (viz. obr.19)



*Obr. 18 Michání geopolymerního pojiva a uhlíkových vláken.*



*Obr. 19 Poté byla geopolymerních kompozitních směs ve formách vibrována na vibračním stolku.*



### **c) Přesné složení připravovaných kompozitních jednotlivých směsí**

- Čistá geopolymerní směs G0 (Cement a Aktivátor)
- Směs S1: Obsahuje 1% uhlíkových vláken a geopolymerní směsi G0
- Směs S3: Obsahuje 3% uhlíkových vláken a geopolymerní směsi G0
- Směs S5: Obsahuje 5% uhlíkových vláken a geopolymerní směsi G0
- Směs S7: Obsahuje 7% uhlíkových vláken a geopolymerní směsi G0
- Směs S8: Obsahuje 8% uhlíkových vláken a geopolymerní směsi G0
- Směs S10: Obsahuje 10% uhlíkových vláken a geopolymerní směsi G0

## **3.2 Sledování zpracovatelských vlastností připravených směsí.**

### **3.2.1 Příprava směsí pro vzorky**

#### **a) Složitost přípravy směsí**

- Směs je poměrně snadno připravitelná. Komplikovaný je pouze přídavek plniva, který musí být zamíchán od pomalých otáček až po vysoké.
- Směs lze připravit velmi pohodlně mixérem ale i s použitím ručního míchadla.
- Důležité je pořadí přidávaných prvků a rychlost jejich míchání, aby nedošlo k tvorbě shluků pojiva nepromíchaného s plnivem. Nejdříve byl tedy smíchán Cement s Aktivátor, poté byla přidána uhlíková vlákna.
- Pro směsi S7, S8, S10 bylo konstatováno, že vysoký obsah plniva (uhlíkových vláken) způsoboval obtížné míchání ručním míchadlem, neboť uhlíková vlákna zvyšovala plasticitu směsi.
- Dalším krokem přípravy bylo zhutňování směsi ve formách na vibračním stolku po dobu dvou minut.

#### **b) Čas přípravy směsí**

Včetně přípravy jednotlivých složek: 20 – 30 min. Při míchání 500g směsi byla doba zpracování 10 – 15 min.

#### **c) Chování směsí během aplikace do forem**

Směs zachovala vlhký a plastický charakter, bez tvorby prasklin. Směs se vyznačuje mírnou lepivostí, a dovoluje tak díky své plasticitě zhutňování do formy.

#### **d) Chování směsí během vyjímání vzorků z forem (odformování)**

Při vyjímání vzorků z forem dochází k ulpívání povrchu vzorků na formě. Směs ve formách byla však díky své vysoké pevnosti u jednodušších tvarů snadno odformovatelná. Odformování bylo možné až po několika dnech (po třech nebo pěti dnech) v závislosti na chemickém složení, velikosti a tvaru vzorků. Čas, kdy bylo možno vzorky z formy vyjmout, byl určen na základě předchozích zkušeností odborné konzultantky.

### 3.2.2 Postup přípravy zkušebních vzorků

Kromě fyzikálně-mechanických vlastností byly u testovaných směsí hodnoceny zpracovatelské a uživatelské vlastnosti, které mají význam pro případného uživatele zkoumaných směsí v praxi.

V experimentální části bylo testováno celkem 7 skupin směsí, a to: G0, S1, S3, S5, S7, S8, S10.

▪ Postup přípravy vzorků k měření:

- Byly připraveny zkušební směsi, které dovolují díky své plasticitě zhutnění do formy.
- Poté byla směs ve formách zhutněna (zvibrována) na vibračním stolku po dobu 2 minut.
- Po doporučeném čase byly vzorky vyjmuty z forem, kdy bylo konstatováno, že směs ve formách byla díky své vysoké pevnosti u jednodušších tvarů snadno odformovatelná.
- K sušení vzorků byl použit ohřev vzorků v elektrické peci .
- Vzorky odlité z formy byly použity pro měření pevnosti v tlaku (maximálního tlakového napětí) a tvrdosti. Pevnost v tlaku byla měřena na vzorcích po době zrání 28 dní, zkoušky tvrdosti a hustoty byly provedeny na vzorcích s dobou zrání 28 dní.
- Kromě mechanických vlastností byla provedena analýza struktury směsí na rastrovacím elektronovém mikroskopu.

### 3.3 Použité formy a jejich užití

Použitá forma je vyrobena z plastu PE - viz. obr.20. Vzorky odlité z této formy byly použity pro měření maximálního tlakového napětí, tvrdosti a hustoty.

- Objem formy  $V = \pi R^2 \times L$  (8)
- Rozměry formy:  $R = 10.1$  [mm],  $L = 29.8$  [mm], objem formy  $V$  [cm<sup>3</sup>].



Obr. 20 Použitá forma.

### 3.4 Elektrická pec

K tepelné úpravě vzorků byly použity dvě elektrické pece:

- Pec s rozsahem do 300°C k ohřevu vzorků při teplotě 60°C, 100°C, 200°C, 300°C (viz. obr.21)
- Pec s rozsahem do 1200°C k ohřevu při teplotách 600°C a 800°C (viz. obr.22)



Obr. 21 Elektrická pec (maximum. 300°C)



Obr. 22 Vzorek při ohřevu (800°C)

### 3.5 Výsledky experimentů

➤ Charakter struktury pomocí SEM a naměřené výsledky.

#### 3.5.1 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla stanovena dle ASTM C 39/C 39M - 01 po 28 dnech zrání při laboratorních podmínkách na zkušebních vzorcích ve tvaru válce o výše uvedených rozměrech.

▪ Postup :

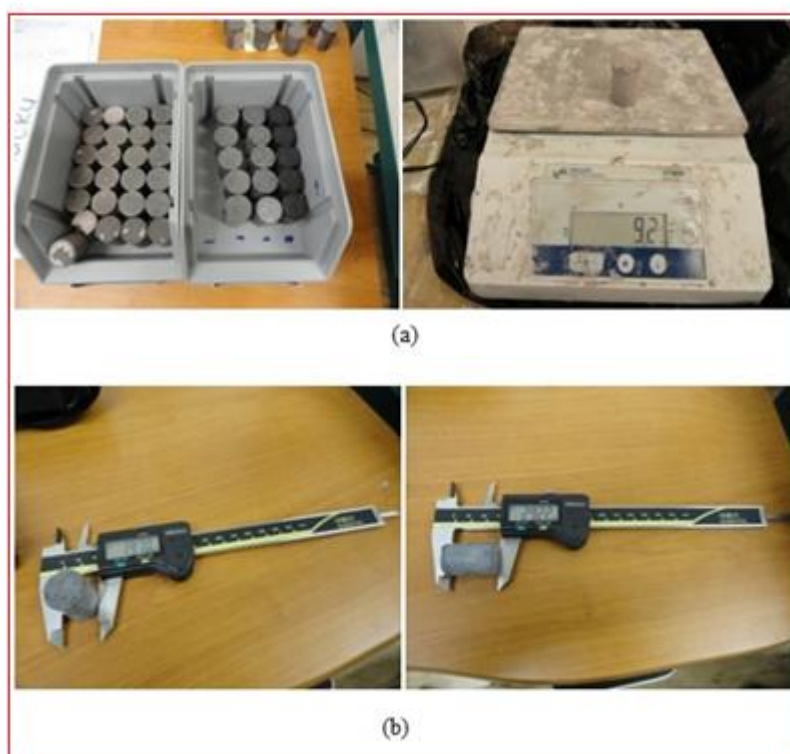
Před měřením vzorků bylo nutno zajistit planoparalelnost a čistotu jejich podstav. Toto bylo zajištěno broušením (viz. obr.23-24)

**a) Měření a broušení testovaných vzorku**



*Obr. 23 Broušení testovaných vzorku.*

- a) Broušení povrchových nerovností u testovaných vzorků.*
- b) Zkušební váleček.*



*Obr. 24*

- a) Měření hmotnosti testovaných vzorků.*
- b) Měření rozměrů testovaných vzorků.*

## b) Uložení a nastavení

Po kontrole uložení a nastavení plošek lisu byly vzorky válců zatěžovány v tlaku. Měření bylo ukončeno při destrukci vzorků (viz. obr.25)

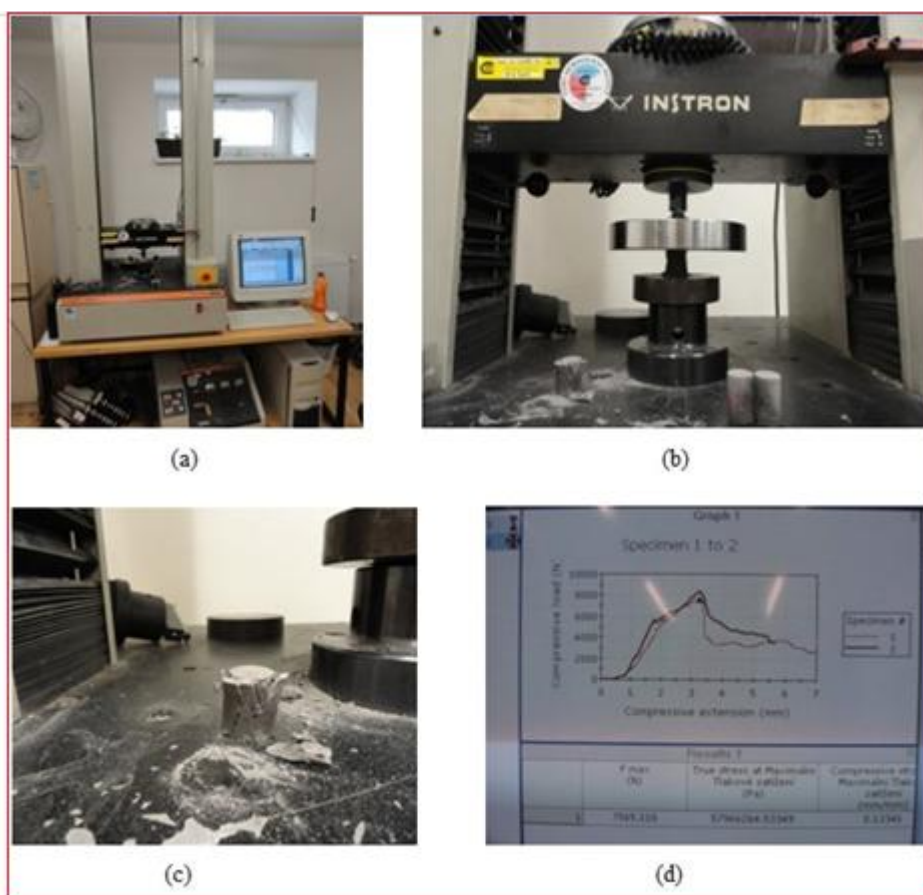
## c) Výsledná pevnost v tlaku byla vypočítána ze vztahu

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{S} \quad (9)$$

kde:  $\sigma_{\max}$  [N/mm<sup>2</sup>] nebo-li [MPa] je pevnost v tlaku – normálové napětí.

$F_{\max}$  [N] je maximální síla nutná k porušení zkušebního vzorku.

S - Plocha [mm<sup>2</sup>]



Obr. 25

- a) Přístroj pro měření pevnosti v tlaku.
- b) Uložení a nastavení
- c) Destrukce vzorku
- d) Křivka deformace – napětí

Pevnost vtlakuje taková hodnota jednoosého napětí, při které dochází úplnému porušení vzorku. Pevnost v tlaku se získává experimentálně z výsledků tlakové zkoušky.

Hodnoty pevností v tlaku byly stanoveny aritmetickým průměrem pevnostních hodnot zjištěných na třech zkušebních válcích.

- Hookeovův zákon: Hookeův zákon popisuje pružnou deformaci materiálu působením síly, za předpokladu malých sil a malých deformací, které po odlehčení zmizí.

Lze jej formulovat ve tvaru: Deformace  $\varepsilon$  je přímo úměrná napětí  $\sigma$  materiálu.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (10)$$

kde:  $E$  = konstanta [GPa], je Youngův modul pružnosti - modul pružnosti v tlaku

$\varepsilon$  [-] (nemá jednotku) – je relativní (poměrná) deformace.

#### d) Deformace

Deformace se vypočítá jako:

$$\varepsilon = \frac{L_0 - L}{L_0} \cdot 100\% \quad (11)$$

kde :  $\Delta L = L_0 - L$  nazýváme (absolutní) deformace [mm]

$\varepsilon$  [-] (nemá jednotku) – je relativní (poměrná) deformace.

$L$  je délka stlačeného vzorku [mm] a  $L_0$  je původní délka vzorku [mm]

#### e) Hustota

$$\rho = \frac{m}{V} = 1273.239 \frac{\text{m}}{\text{L} \cdot \text{d}^2} \quad (12)$$

kde: Hmotnost zkušební vzorku  $m$  [g]

Průměr zkušební vzorku  $\varnothing d$  [mm]

Výška zkušební vzorku  $L$  [mm]

Hustota zkušební vzorku  $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>]

Objem zkušební vzorku  $V$  [cm<sup>3</sup>]

### 3.5.2 Použité metoda pro stanovení tvrdosti vzorových povrchu

Tvrdot rozhoduje o opotřebení povrchu součásti, materiál se neporuší → měřením tvrdosti se ovlivní jen velmi malý objem na povrchu



Obr.26 Použité metoda pro měření tvrdosti vzorových povrchu.

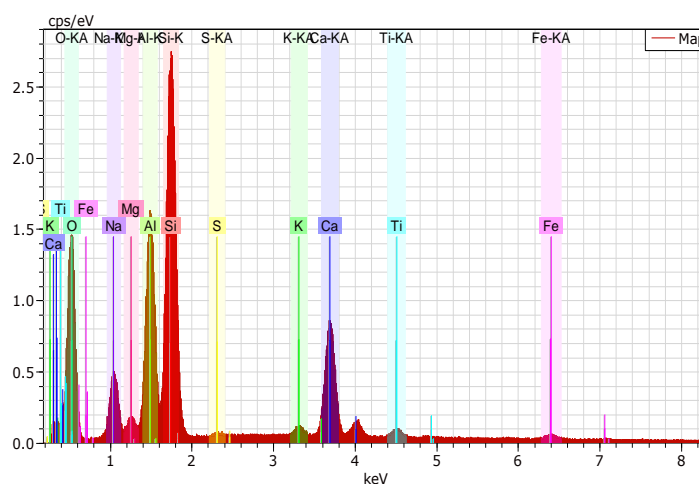
### 3.5.3 Pozorování mikrostruktury

#### a) Chemické složení geopolymery L160 v hmotnostních procentech (hm. %)

Tab. 1 Chemické složení geopolymery L160 v hmotnostních procentech (hm. %)

(X-ray analysis)

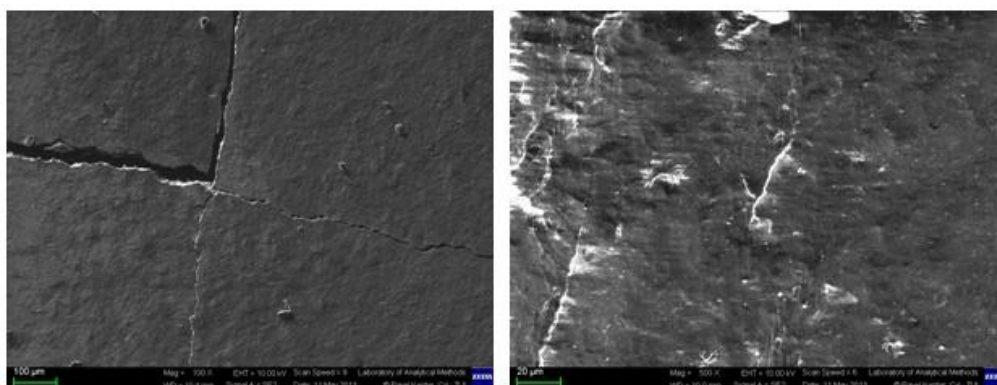
Element	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	FeO	Σ
Wt %	9.24	2.12	24.03	50.94	0.44	0.61	10.08	0.97	0.85	99.28%



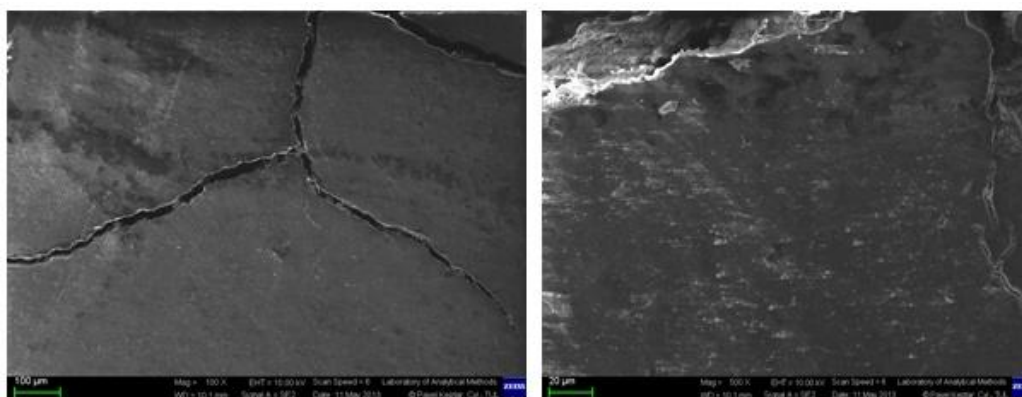
Graf. 1 EDX spektrum čistého geopolymery.



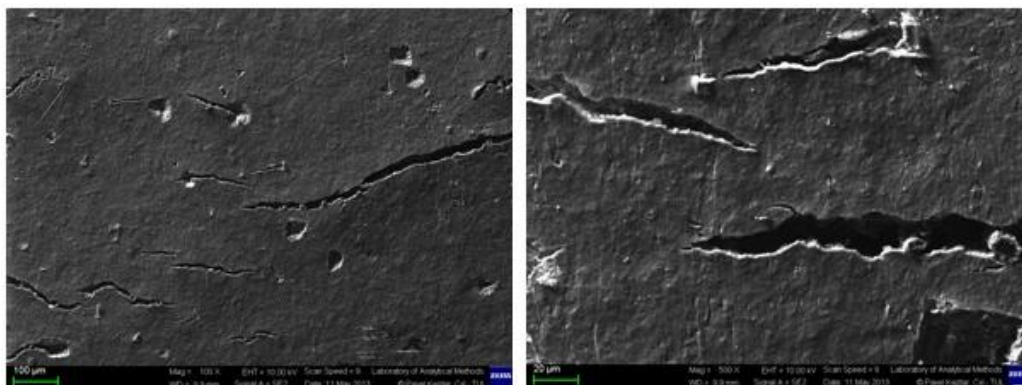
**b) Charakter struktury pomocí SEM**



*Obr. 27 SEM čistého geopolymery G0*

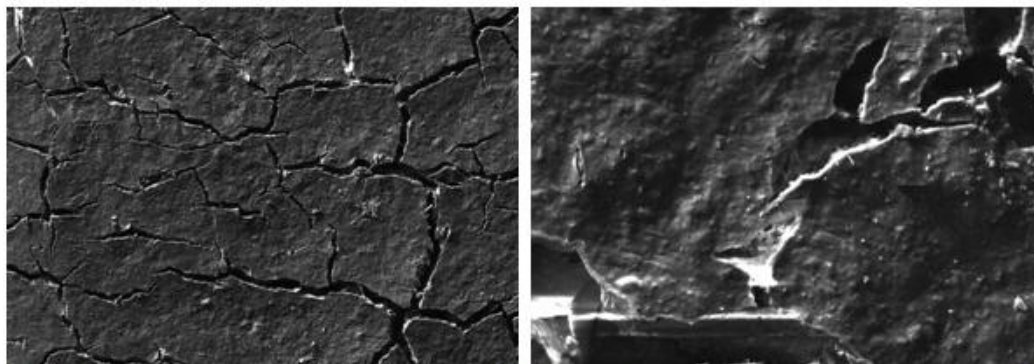


*Obr. 28 SEM geopolymery s 1% C-vlákén*

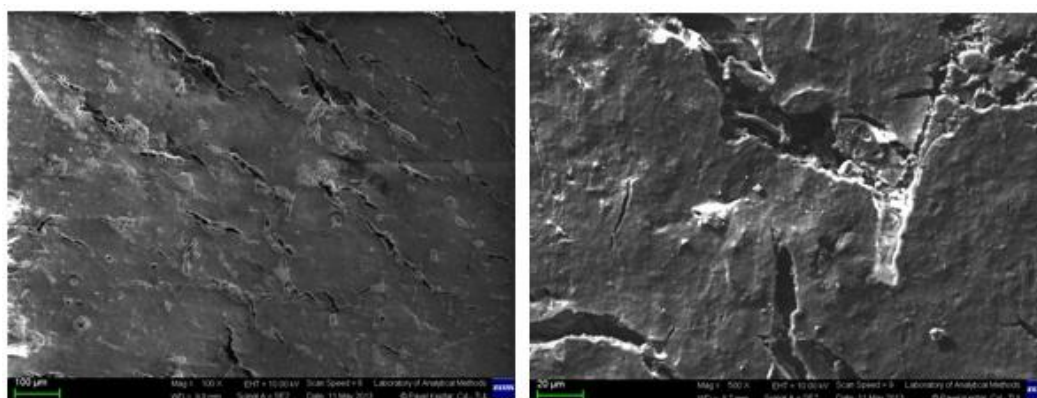


*Obr. 29 SEM geopolymery s 3% C-vlákén*

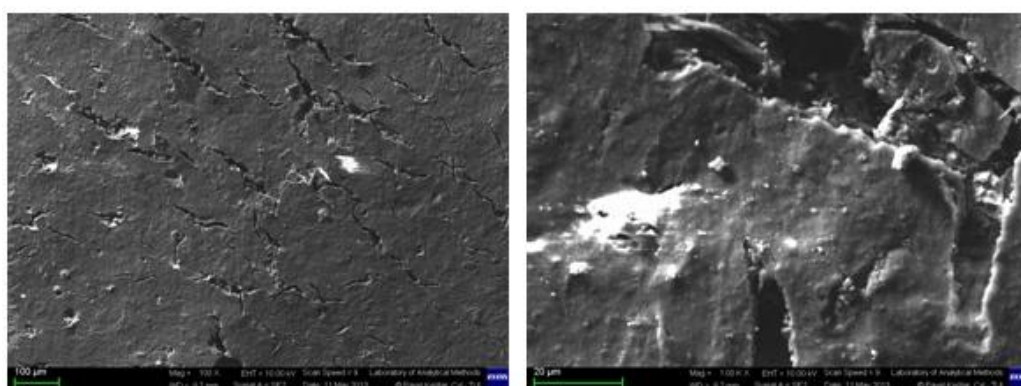




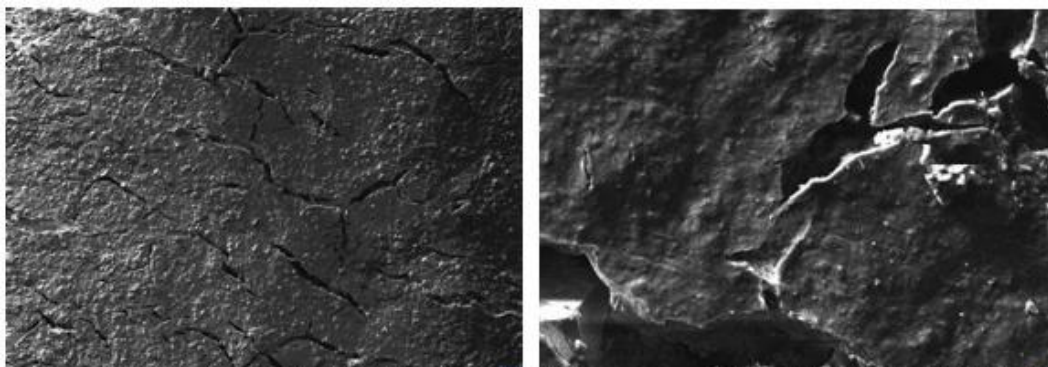
*Obr. 30 SEM geopolymeru s 5% C-vláken*



*Obr. 31 SEM geopolymeru s 7% C-vláken*



*Obr. 32 SEM geopolymeru s 8% C-vláken*



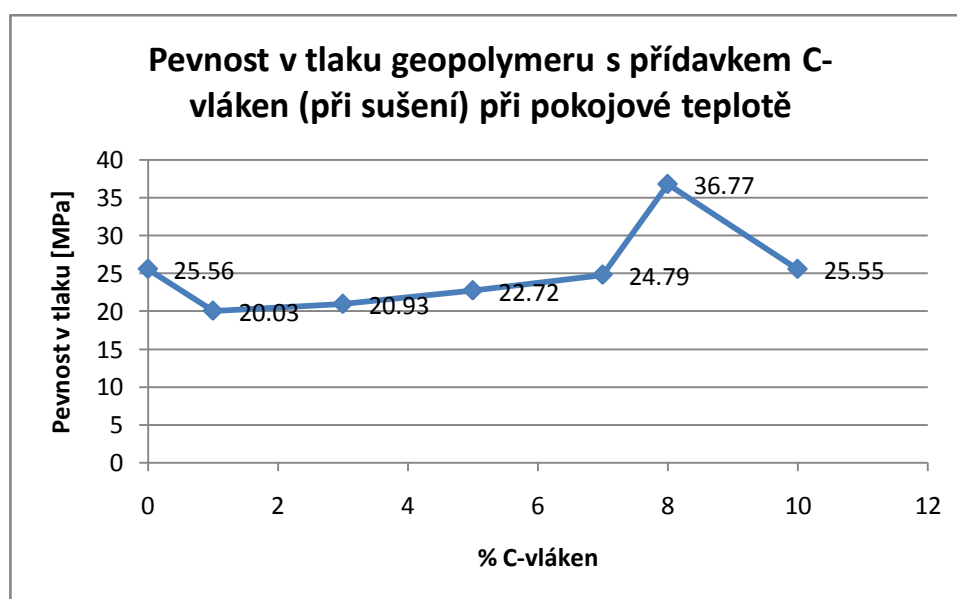
*Obr. 33 SEM geopolymeru s 10% C-vláken*

### 3.5.4 Výsledky

Vypočítané hodnoty pevnosti v tlaku jsou uvedeny v tabulce a jejich grafické znázornění je prezentováno na obrázcích.

Tab. 2 Vzorky s uhlíkovým vláknem, při pokojové teplotě (23 - 25°C) po 28 dní

Teplota ohřevu (°C)	% Mletých uhlíkových vláken	Tvrdost po 28 dnech (HV)	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Tlakové napětí (MPa)	Směsi
při pokojové teplotě	0%	270±4.11	1.819	25.56	G0
	1%	235±3.34	1.728	20.03	S1
	3%	220±7.06	1.610	20.93	S3
	5%	232±2.09	1.597	22.72	S5
	7%	212±5.61	1.557	24.79	S7
	8%	230±4.55	1.462	36.77	S8
	10%	208±8.87	1.408	25.55	S10

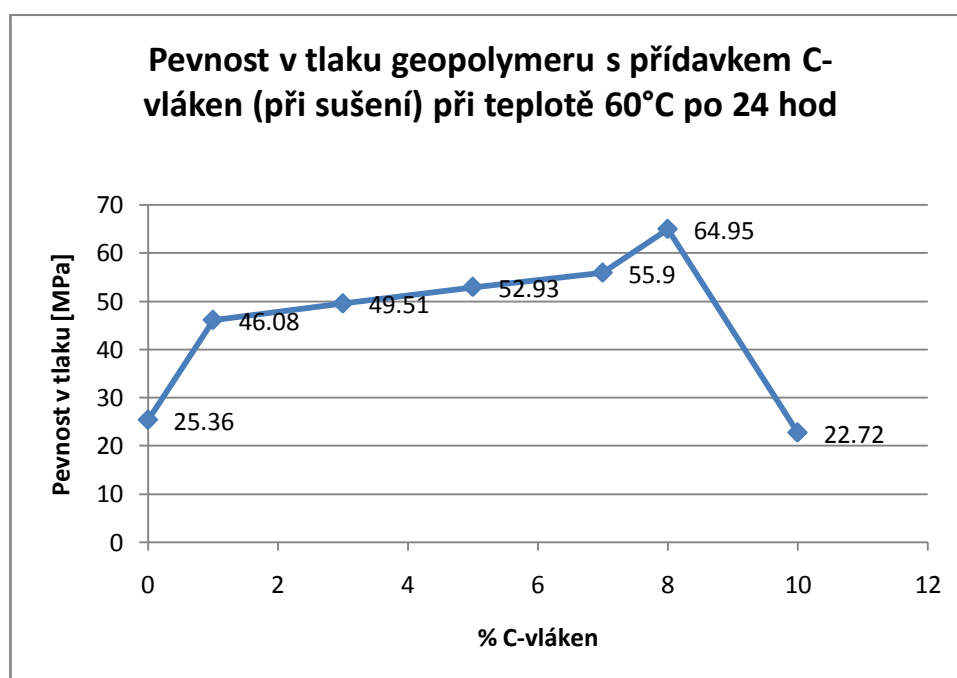


Graf. 2 Pevnost v tlaku geopolymery s přidavkem C-vláken (při sušení) při pokojové teplotě

V diagramu je presentována lineární regrese pevnosti v tlaku a obsahu C-vláken v geopolymerech. Výsledky ukazují na velkou závislost mezi typy kompozitů o různém obsahu C-vláken, době sušení a teplotě sušení. Jestliže srovnáme hodnoty pevnosti v tlaku geopolymerních kompozitů se stejným obsahem C-vláken a teplotou sušení, je patrné, že kompozit s 8% obsahu vláken po sušení při pokojové teplotě, má nejvyšší pevnost v tlaku, a to 36.77 MPa

Tab. 3 Vzorky s uhlíkovým vláknem, s ohřevem při teplotě (60°C po 24 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu (°C)	% Mletých uhlíkových vláken	Tvrdoost po 28 dnech (HV)	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Tlakové napětí (MPa)	Směsi
při teplotě 60°C po 24h	0%	251±3.31	1.469	25.36	G0
	1%	242±4.02	1.467	46.08	S1
	3%	243±11.09	1.464	49.51	S3
	5%	238±5.57	1.452	52.93	S5
	7%	229±2.28	1.439	55.9	S7
	8%	244±4.54	1.419	64.95	S8
	10%	197±6.6	1.410	22.72	S10

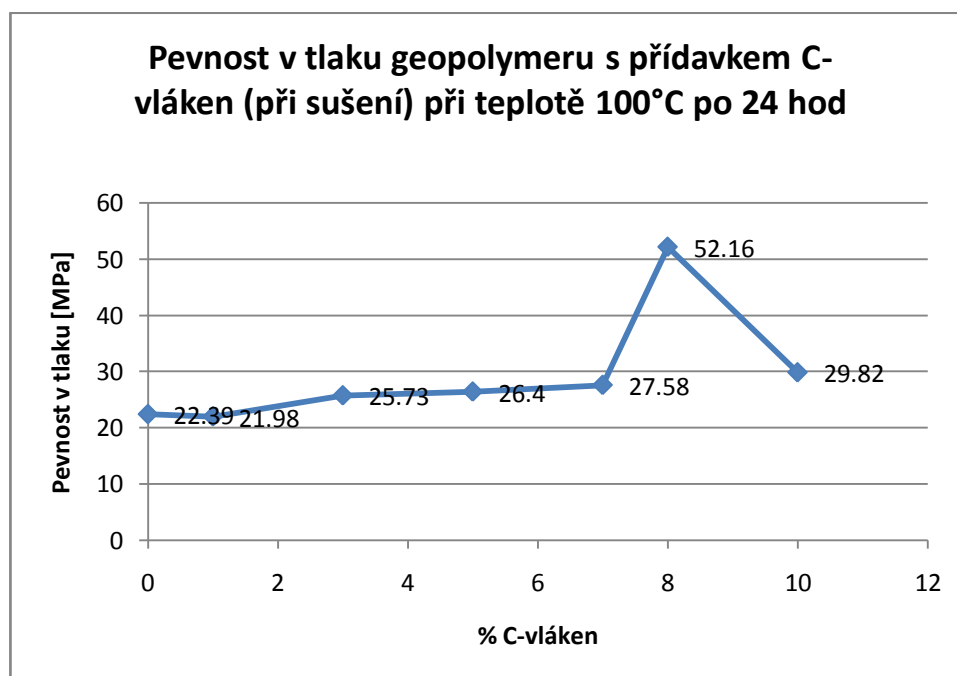


Graf. 3 Pevnost v tlaku geopolymery s přidavkem C-vláken (při sušení) při teplotě 60°C po 24 hod.

V diagramu je presentována lineární regrese pevnosti v tlaku a obsahu C-vláken v geopolymerech. Výsledky ukazují na velkou závislost mezi typy kompozitů o různém obsahu C-vláken, době sušení a teplotě sušení. Jestliže srovnáme hodnoty pevnosti v tlaku geopolymerních kompozitů se stejným obsahem C-vláken a teplotou sušení, je patrné, že kompozit s 8% obsahu vláken po sušení na 60°C po dobu 24 hod, má nejvyšší pevnost v tlaku, a to 64.95 MPa

Tab. 4 Vzorky s uhlíkovým vláknem, s ohřevem při teplotě (100°C po 24 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu (°C)	% Mletých uhlíkových vláken	Tvrdoost po 28 dnech (HV)	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Tlakové napětí (MPa)	Směsi
při teplotě 100°C po 24h	0%	210±10.11	1.711	22.39	G0
	1%	244±4.01	1.627	21.98	S1
	3%	221±5.28	1.559	25.73	S3
	5%	194±2.27	1.525	26.4	S5
	7%	197±7.02	1.514	27.58	S7
	8%	244±3.21	1.484	52.16	S8
	10%	188±4.23	1.324	29.82	S10

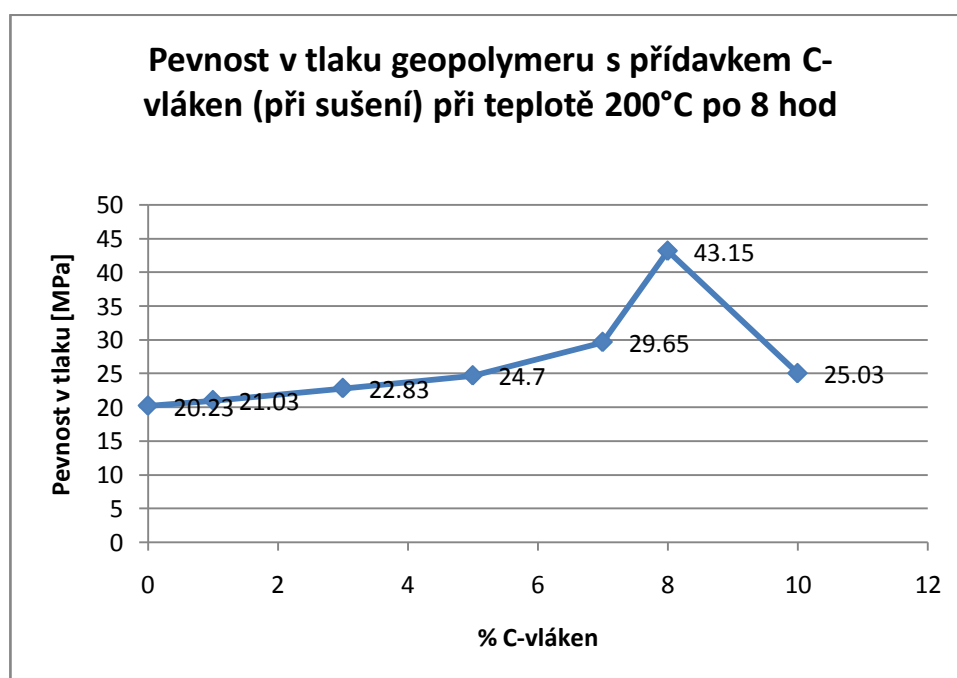


Graf. 4 Pevnost v tlaku geopolymery s přidavkem C-vláken (při sušení) při teplotě 100°C po 24 hod

V diagramu je presentována lineární regrese pevnosti v tlaku a obsahu C-vláken v geopolymerech. Výsledky ukazují na velkou závislost mezi typy kompozitů o různém obsahu C-vláken, době sušení a teplotě sušení. Jestliže srovnáme hodnoty pevnosti v tlaku geopolymerních kompozitů se stejným obsahem C-vláken a teplotou sušení, je patrné, že kompozit s 8% obsahu vláken po sušení na 100°C po dobu 24 hod, má nejvyšší pevnost v tlaku, a to 52.16 MPa

Tab. 5 Vzorky s uhlíkovým vláknem, s ohřevem při teplotě (200 °C po 8 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu (°C)	% Mletých uhlíkových vláken	Tvrdoost po 28 dnech (HV)	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Tlakové napětí (MPa)	Směsi
při teplotě 200°C po 8h	0%	194±4.87	1.760	20.23	G0
	1%	247±6.33	1.676	21.03	S1
	3%	223±2.30	1.590	22.83	S3
	5%	241±7.21	1.561	24.7	S5
	7%	231±3.87	1.534	29.65	S7
	8%	231±6.58	1.449	43.15	S8
	10%	199±8.21	1.431	25.03	S10

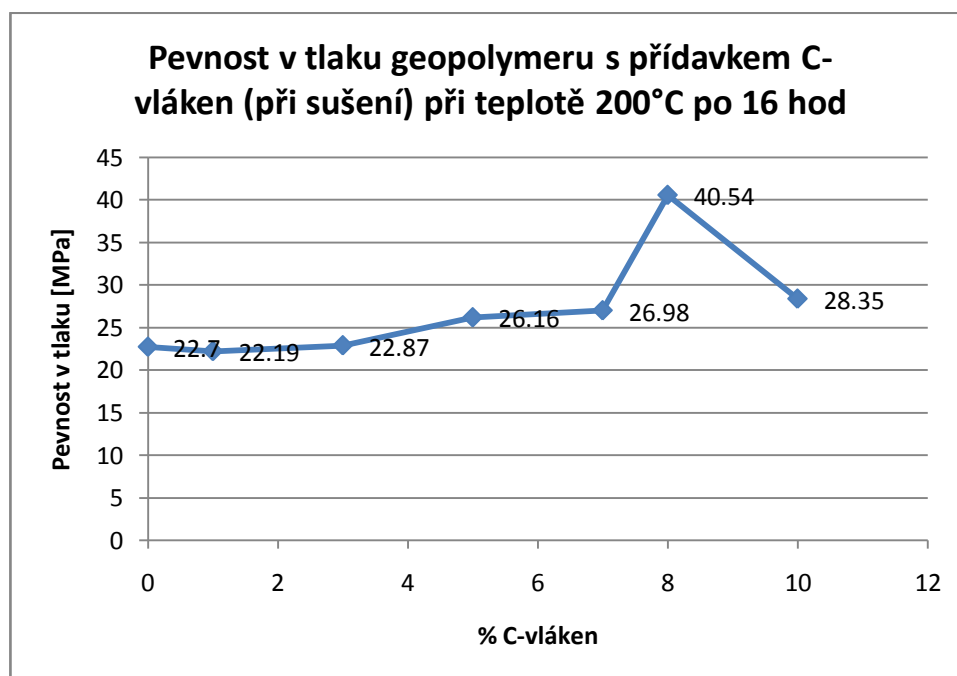


Graf. 5 Pevnost v tlaku geopolymery s přidavkem C-vláken (při sušení) při teplotě 200°C po 8 hod

V diagramu je presentována lineární regrese pevnosti v tlaku a obsahu C-vláken v geopolymerech. Výsledky ukazují na velkou závislost mezi typy kompozitů o různém obsahu C-vláken, době sušení a teplotě sušení. Jestliže srovnáme hodnoty pevnosti v tlaku geopolymerních kompozitů se stejným obsahem C-vláken a teplotou sušení, je patrné, že kompozit s 8% obsahu vláken po sušení na 200°C po dobu 8 hod, má nejvyšší pevnost v tlaku, a to 43.15 MPa

Tab. 6 Vzorky s uhlíkovým vláknem, s ohřevem při teplotě (200°C po 16 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu (°C)	% Mletých uhlíkových vláken	Tvrdost po 28 dnech (HV)	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Tlakové napětí (MPa)	Směsi
při teplotě 200°C po 16h	0%	199±10.01	1.810	22.7	G0
	1%	258±6.32	1.749	22.19	S1
	3%	226±9.1	1.554	22.87	S3
	5%	229±4.68	1.536	26.16	S5
	7%	231±6.72	1.524	26.98	S7
	8%	225±3.64	1.448	40.54	S8
	10%	186±5.14	1.371	28.35	S10

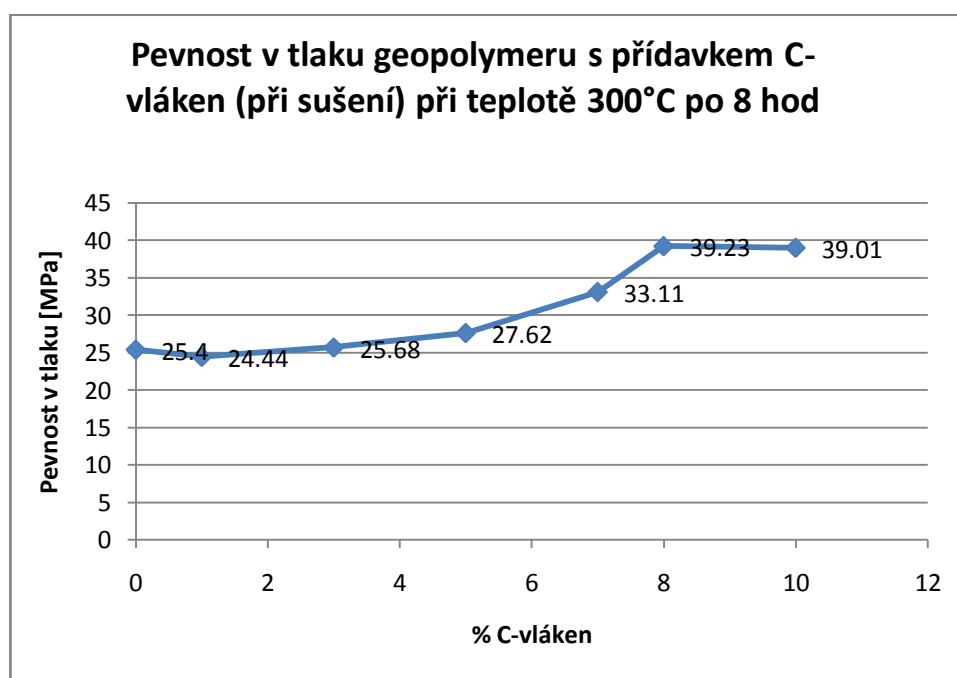


Graf. 6 Pevnost v tlaku geopolymery s přidavkem C-vláken (při sušení) při teplotě 200°C po 16 hod

V diagramu je presentována lineární regrese pevnosti v tlaku a obsahu C-vláken v geopolymerech. Výsledky ukazují na velkou závislost mezi typy kompozitů o různém obsahu C-vláken, době sušení a teplotě sušení. Jestliže srovnáme hodnoty pevnosti v tlaku geopolymerních kompozitů se stejným obsahem C-vláken a teplotou sušení, je patrné, že kompozit s 8% obsahu vláken po sušení na 200°C po dobu 16 hod, má nejvyšší pevnost v tlaku, a to 40.54 MPa

Tab. 7 Vzorky s uhlíkovým vláknem, s ohřevem při teplotě (300°C po 8 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu (°C)	% Mletých uhlíkových vláken	Tvrdost po 28 dnech (HV)	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Tlakové napětí (MPa)	Směsi
při teplotě 300°C po 8h	0%	231±2.66	1.602	25.4	G0
	1%	215±4.35	1.530	24.44	S1
	3%	224±3.02	1.481	25.68	S3
	5%	232±8.21	1.462	27.62	S5
	7%	224±5.64	1.456	33.11	S7
	8%	216±4.79	1.432	39.23	S8
	10%	201±6.33	1.293	39.01	S10



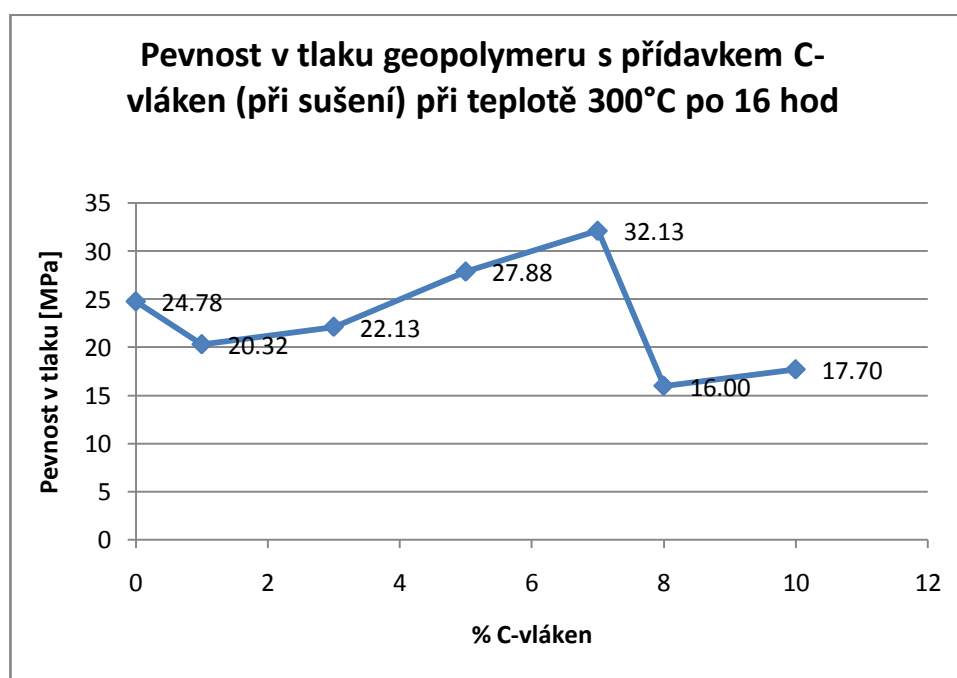
Graf. 7 Pevnost v tlaku geopolymery s přidavkem C-vláken (při sušení) při teplotě 300°C po 8 hod

V diagramu je presentována lineární regrese pevnosti v tlaku a obsahu C-vláken v geopolymerech. Výsledky ukazují na velkou závislost mezi typy kompozitů o různém obsahu C-vláken, době sušení a teplotě sušení. Jestliže srovnáme hodnoty pevnosti v tlaku geopolymerních kompozitů se stejným obsahem C-vláken a teplotou sušení, je patrné, že kompozit s 8% obsahu vláken po sušení na 300°C po dobu 8 hod, má nejvyšší pevnost v tlaku, a to 39.23 MPa



Tab. 8 Vzorky s uhlíkovým vláknem, s ohřevem při teplotě (300°C po 16 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu (°C)	% Mletých uhlíkových vláken	Tvrdoost po 28 dnech (HV)	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Tlakové napětí (MPa)	Směsi
při teplotě 300°C po 16h	0%	206±5.05	1.717	24.78	G0
	1%	238±6.32	1.590	20.32	S1
	3%	250±9.54	1.548	22.13	S3
	5%	238±2.77	1.495	27.88	S5
	7%	242±6.08	1.461	32.13	S7
	8%	232±8.14	1.378	16.00	S8
	10%	227±3.32	1.243	17.70	S10

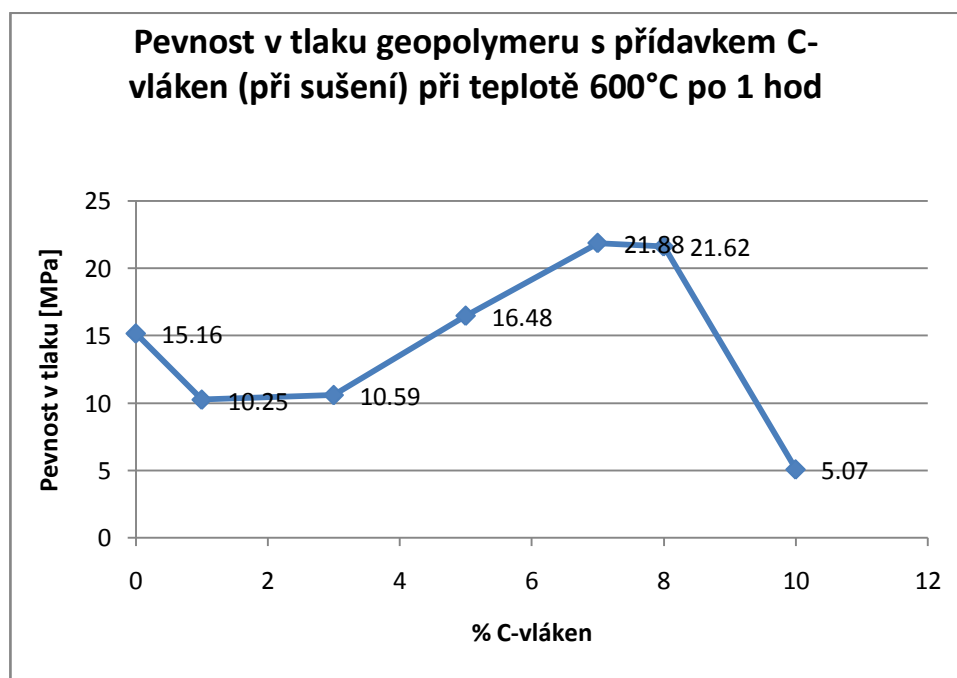


Graf. 8 Pevnost v tlaku geopolymery s přidavkem C-vláken (při sušení) při teplotě 300°C po 16 hod

V diagramu je presentována lineární regrese pevnosti v tlaku a obsahu C-vláken v geopolymerech. Výsledky ukazují na velkou závislost mezi typy kompozitů o různém obsahu C-vláken, době sušení a teplotě sušení. Jestliže srovnáme hodnoty pevnosti v tlaku geopolymerních kompozitů se stejným obsahem C-vláken a teplotou sušení, je patrné, že kompozit s 7% obsahu vláken po sušení na 300°C po dobu 16 hod, má nejvyšší pevnost v tlaku, a to 32.13 MPa

Tab. 9 Vzorčky s uhlíkovým vláknem, s ohřevem při teplotě (600°C po 1 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu (°C)	% Mletých uhlíkových vláken	Tvrdoost po 28 dnech (HV)	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Tlakové napětí (MPa)	Směsi
při teplotě 600°C po 1h	0%	188±4.24	1.613	15.16	G0
	1%	173±3.06	1.483	10.25	S1
	3%	204±7.09	1.435	10.59	S3
	5%	220±5.1	1.427	16.48	S5
	7%	202±6.8	1.394	21.88	S7
	8%	206±2.9	1.363	21.62	S8
	10%	182±7.1	1.159	5.07	S10

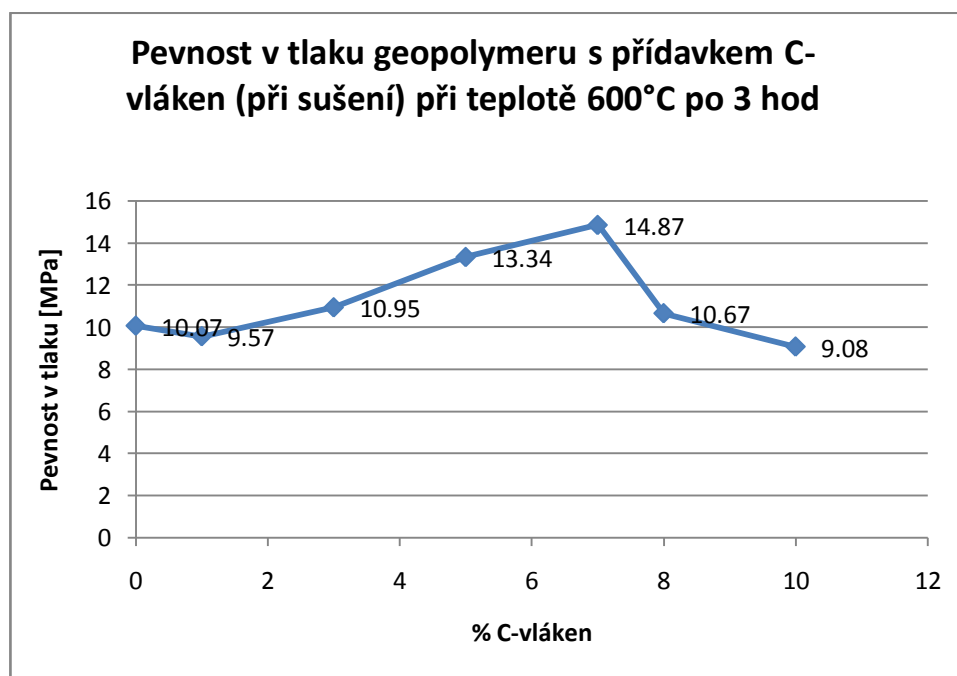


Graf. 9 Pevnost v tlaku geopolymery s přidavkem C-vláken (při sušení) při teplotě 600°C po 1 hod

V diagramu je presentována lineární regrese pevnosti v tlaku a obsahu C-vláken v geopolymerech. Výsledky ukazují na velkou závislost mezi typy kompozitů o různém obsahu C-vláken, době sušení a teplotě sušení. Jestliže srovnáme hodnoty pevnosti v tlaku geopolymerních kompozitů se stejným obsahem C-vláken a teplotou sušení, je patrné, že kompozit s 7% obsahu vláken po sušení na 600°C po dobu 1 hod, má nejvyšší pevnost v tlaku, a to 21.88 MPa

Tab. 10 Vzorky s uhlíkovým vláknem, s ohřevem při teplotě (600°C po 3 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu (°C)	% Mletých uhlíkových vláken	Tvrdoost po 28 dnech (HV)	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Tlakové napětí (MPa)	Směsi
při teplotě 600°C po 3h	0%	183±5.51	1.466	10.07	G0
	1%	189±7.32	1.472	9.57	S1
	3%	191±3.8	1.454	10.95	S3
	5%	175±8.07	1.411	13.34	S5
	7%	181±6.06	1.305	14.87	S7
	8%	184±4.1	1.269	10.67	S8
	10%	171±3.2	1.073	9.08	S10

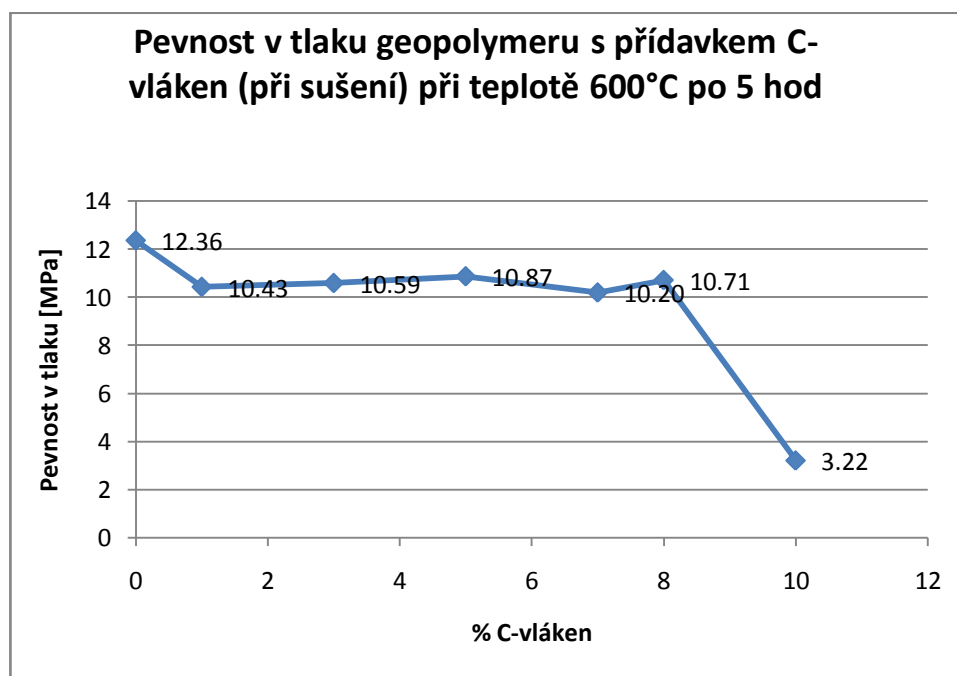


Graf. 10 Pevnost v tlaku geopolymery s přidavkem C-vláken (při sušení) při teplotě 600°C po 3 hod

V diagramu je presentována lineární regrese pevnosti v tlaku a obsahu C-vláken v geopolymerech. Výsledky ukazují na velkou závislost mezi typy kompozitů o různém obsahu C-vláken, době sušení a teplotě sušení. Jestliže srovnáme hodnoty pevnosti v tlaku geopolymerních kompozitů se stejným obsahem C-vláken a teplotou sušení, je patrné, že kompozit s 7% obsahu vláken po sušení na 600°C po dobu 3 hod, má nejvyšší pevnost v tlaku, a to 14.87 MPa

Tab. 11 Vzorky s uhlíkovým vláknem, s ohřevem při teplotě (600°C po 5 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu (°C)	% Mletých uhlíkových vláken	Tvrdoost po 28 dnech (HV)	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Tlakové napětí (MPa)	Směsi
při teplotě 600°C po 5h	0%	183±8.64	1.596	12.36	G0
	1%	194±3.54	1.490	10.43	S1
	3%	192±2.32	1.397	10.59	S3
	5%	207±7.11	1.357	10.87	S5
	7%	195±6.02	1.323	10.20	S7
	8%	196±3.6	1.280	10.71	S8
	10%	178±5.5	1.104	3.22	S10

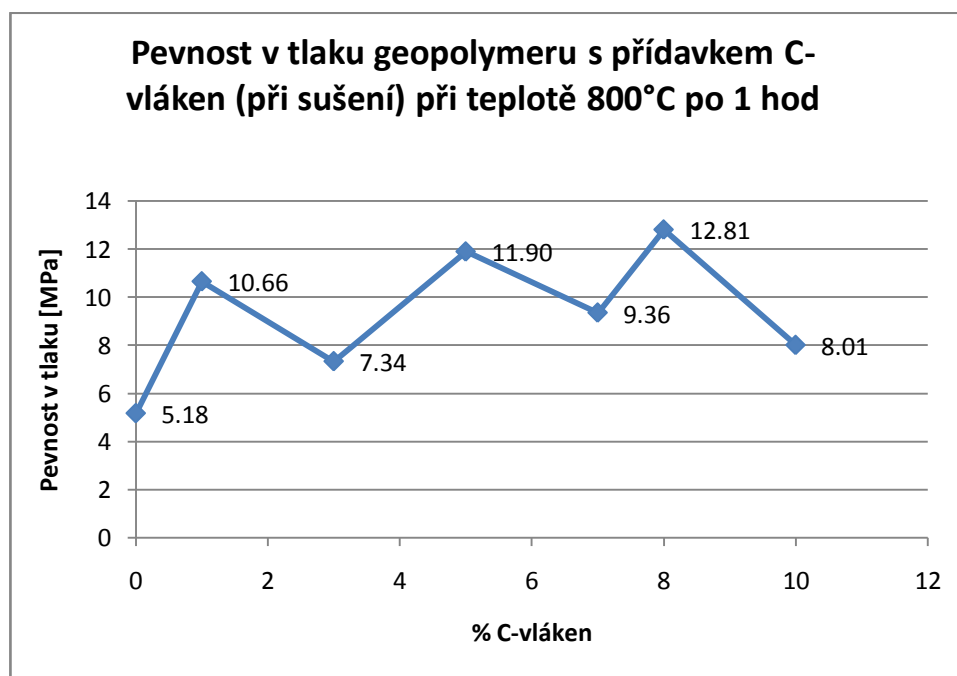


Graf. 11 Pevnost v tlaku geopolymery s přidavkem C-vláken (při sušení) při teplotě 600°C po 5 hod

V diagramu je presentována lineární regrese pevnosti v tlaku a obsahu C-vláken v geopolymerech. Výsledky ukazují na velkou závislost mezi typy kompozitů o různém obsahu C-vláken, době sušení a teplotě sušení. Jestliže srovnáme hodnoty pevnosti v tlaku geopolymerních kompozitů se stejným obsahem C-vláken a teplotou sušení, je patrné, že kompozit s 0% obsahu vláken po sušení na 600°C po dobu 5 hod, má nejvyšší pevnost v tlaku, a to 12.36 MPa

Tab. 12 Vzorky s uhlíkovým vláknem, s ohřevem při teplotě (800°C po 1 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu (°C)	% Mletých uhlíkových vláken	Tvrдость po 28 dnech (HV)	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Tlakové napětí (MPa)	Směsi
při teplotě 800°C po 1h	0%	236±7.37	1.657	5.18	G0
	1%	202±2.19	1.578	10.66	S1
	3%	184±4.05	1.533	7.34	S3
	5%	192±8.32	1.525	11.90	S5
	7%	182±9.75	1.401	9.36	S7
	8%	203±5.01	1.376	12.81	S8
	10%	179±3.2	1.119	8.01	S10

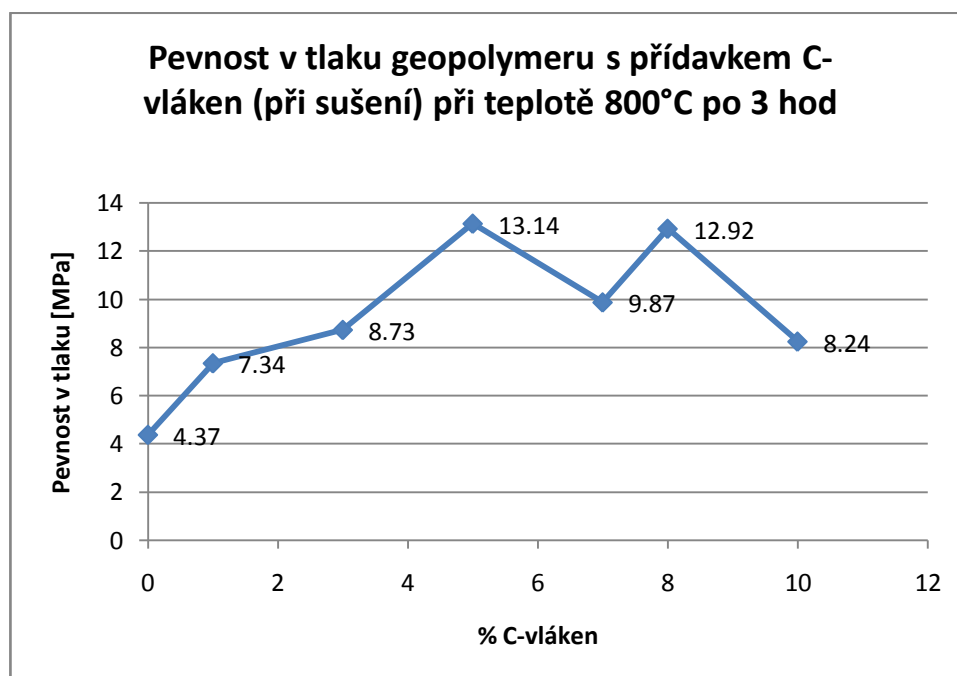


Graf. 12 Pevnost v tlaku geopolymery s přidavkem C-vláken (při sušení) při teplotě 800°C po 1 hod

V diagramu je presentována lineární regrese pevnosti v tlaku a obsahu C-vláken v geopolymerech. Jestliže se zvyšuje teplota sušení, pevnost v tlaku rychle klesá, obzvláště při 800°C a dále se nemění.

Tab. 13 Vzorky s uhlíkovým vláknem, s ohřevem při teplotě (800°C po 3 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu (°C)	% Mletých uhlíkových vláken	Tvrdoost po 28 dnech (HV)	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Tlakové napětí (MPa)	Směsi
při teplotě 800°C po 3h	0%	201±5.21	1.592	4.37	G0
	1%	191±7.64	1.578	7.34	S1
	3%	196±5.32	1.542	8.73	S3
	5%	200±8.05	1.492	13.14	S5
	7%	203±4.03	1.355	9.87	S7
	8%	186±2.5	1.360	12.92	S8
	10%	196±6.0	1.111	8.24	S10

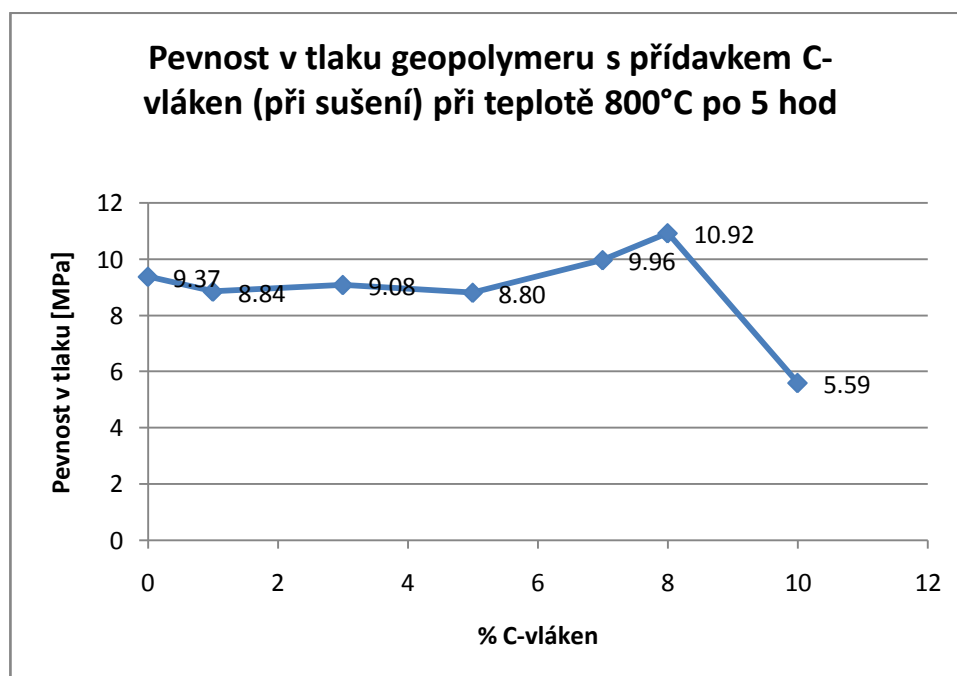


Graf. 13 Pevnost v tlaku geopolymery s přidavkem C-vláken (při sušení) při teplotě 800°C po 3 hod

V diagramu je presentována lineární regrese pevnosti v tlaku a obsahu C-vláken v geopolymerech. Jestliže se zvyšuje teplota sušení, pevnost v tlaku rychle klesá, obzvláště při 800°C a dále se nemění.

Tab. 14 Vzorky s uhlíkovým vláknem, s ohřevem při teplotě (800°C po 5 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu (°C)	% Mletých uhlíkových vláken	Tvrdoost po 28 dnech (HV)	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Tlakové napětí (MPa)	Směsi
při teplotě 800°C po 5h	0%	201±5.1	1.940	9.37	G0
	1%	194±4.03	1.709	8.84	S1
	3%	200±6.21	1.621	9.08	S3
	5%	211±3.15	1.491	8.80	S5
	7%	190±7.04	1.387	9.96	S7
	8%	191±3.05	1.369	10.92	S8
	10%	188±2.29	1.122	5.59	S10



Graf. 14 Pevnost v tlaku geopolymery s přidavkem C-vláken (při sušení) při teplotě 800°C po 5 hod

V diagramu je presentována lineární regrese pevnosti v tlaku a obsahu C-vláken v geopolymerech. Jestliže se zvyšuje teplota sušení, pevnost v tlaku rychle klesá, obzvláště při 800°C a dále se nemění.

### 3.5.5 Diskuze výsledků

Z experimentů vyplývá, že geopolymerní kompozity připravené s 1 – 8 hm.% C-vláken vykazují vhodnou viskozitu, zatímco kompozity s 10 hm. % C-vláken jsou tuhé a obtížně se mísí s plastickou matricí.

Byly studovány geopolymerní kompozity připravené s variovanými úrovněmi C-vláken a jejich mechanické vlastnosti. V diagramu je presentována lineární regrese pevnosti v tlaku a obsahu C-vláken v geopolymerech. Výsledky ukazují na velkou závislost mezi typy obsahu C-vláken, době sušení a teplotě sušení.

Jestliže srovnáme hodnoty pevnosti v tlaku geopolymerních kompozitů se stejným obsahem C-vláken a teplotou sušení, je patrné, že kompozit s 8% obsahu vláken po sušení na 60°C po dobu 24 hod má nejvyšší pevnost v tlaku, a to 64,95 MPa. Jestliže se procentuální obsah C-vláken zvyšuje, zvyšují se rovněž mechanické vlastnosti geopolymery. Při 1 – 8 hm.% zastoupení C-vláken se pevnost v tlaku zvětšuje, a klesá při obsahu 10 hm.% C-vláken.

Dále experimenty ukazují, že mechanické vlastnosti geopolymerních kompozitů po sušení na 60°C po dobu 24 hod jsou největší. Jestliže se zvyšuje teplota sušení, pevnost v tlaku rychle klesá, obzvláště při 800°C a nemění se.



## 4. ZÁVĚR

V předložené práci byla provedena analýza vlastností kompozitních materiálů na bázi geopolymérů s aditivu (výztuží) z krátkých uhlíkových vláken.

- Před vlastním vypracováním (experimentem) byla provedena literární rešerše na téma řešené problematiky. Z rozboru řešené problematiky vyplývá, že se jedná o téma, které je nutno řešit také v budoucnu, přestože se geopolymery zabývá řada pracovišť v ČR a v zahraničí. Znamená to, že geopolymery jsou materiálem, s nímž se musí počítat. Z průzkumu literatury rovněž vyplynula možnost ovlivnit vlastnosti kompozitů na bázi geopolymérů různými aditivu a zároveň skutečnost, že zapracování odpadových namletých uhlíkových vláken není dořešen. Proto bylo zpracováno toto téma v bakalářské práci.

Na základě získaných poznatků byl navržen experiment, který je zpracován v experimentální části práce. Byly analyzovány mechanické vlastnosti kompozitů vyrobených v řadě:

- Čistá geopolymerní směs G0 (Cement a Aktivátor)
- Směs S1: Obsahuje 1% uhlíkových vláken a geopolymerní směsi G0
- Směs S3: Obsahuje 3% uhlíkových vláken a geopolymerní směsi G0
- Směs S5: Obsahuje 5% uhlíkových vláken a geopolymerní směsi G0
- Směs S7: Obsahuje 7% uhlíkových vláken a geopolymerní směsi G0
- Směs S8: Obsahuje 8% uhlíkových vláken a geopolymerní směsi G0
- Směs S10: Obsahuje 10% uhlíkových vláken a geopolymerní směsi G0

Zároveň byla variována teplota a čas sušení směsí.

Na vzorcích byly změřeny mechanické vlastnosti, a to pevnost v tlaku.

Z experimentální části práce vyplynulo:

- Mechanické vlastnosti geopolymerních kompozitů jsou velmi závislé na množství přidaných uhlíkových vláken a na teplotě a času sušení. Nejlepší vlastnosti vykazuje geopolymér s 8% ním obsahem uhlíkových vláken při sušení na 60°C po dobu 24 hod. Tato směs vykazuje nejvyšší pevnost v tlaku, a to 64,95 MPa.
- Nejhorší výsledky byly dosaženy u vzorku s 10% ním obsahem C-vláken, a to při všech variantách dalšího zpracování (teplota a čas sušení).

Naměřené výsledky jsou znázorněny v grafech. Z takto zpracovaných výsledků měření lze konstatovat:

- Přes rozkolísanost některých hodnot pevnost v tlaku u všech směsí stoupá až do obsahu vláken 8%. Pouze u vzorku 8% vláken a sušení při 300°C po dobu 16 hod. A u téhož vzorku při sušení při 600°C po dobu 3 hod. Toto neplatí a hodnoty jsou nižší, než u vzorku se 7% obsahu C-vláken.
- Při měření pevnosti v tlaku došlo k rozdrčení vzorků, jak je znázorněno na obr. 25. Čistý geopolymér po tepelné expozici vykazoval velkou křehkost a výskyt trhlin při měření, velmi klesala rázová pevnost (např. při pádu vzorku na zem).

- Se zvyšujícím se obsahem C-vláken klesá měrná hmotnost (hustota) vzorků. Vzorky jsou rovněž houževnatější.

## 5. SEZNAM LITERATURY

### *Použité zdroje:*

- [1] MACHEK, V., SODOMKA, J.: Polymery a kompozity polymerní maticí. Nauka o materiálu. 4. část. 1. vyd., ČVUT Praha, s.86, ISBN 978-80-01-03927-4
- [2] MÍŠEK, B.: Kompozity, 1. vyd., 2003, vydav.: TDS Brno - Sekce materiálů a svařování, Tisk: Přesely s.r.o. Brno, str. 81, ISBN 80-903386-0-7
- [3] REDDY, C.,S., et al.: Propylene-Ethylene Copolymer Nanocomposites: Epoxy Resin Grafted Nanosilica as a Reinforcing Filler. Polymer Composites. Vol. 26, Iss. 6
- [4] Definice, rozdělení, historie a použití kompozitních materiálů u lodí a letadel. [online], [cit. 2010-2-19] Dostupný z: <http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>
- [5] HLASOVÁ, Martina. OPTIMALIZACE ROZHRANÍ VLÁKNO MATRICE U KOMPOZITŮ S KERAMICKOU MATRICÍ [online]. Brno, 2011 [cit. 2012-02-24]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=37819](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=37819). Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Chlup, Ph.D.
- [6] BIBUS S. R. O. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY\_COMAT (COMPOSITE MATERIALS GMBH) [online]. Brno[cit. 2012-02-24]. Dostupné z: [http://new.bibus.cz/pdf/Comat/Kompozitni\\_materialy\\_COMAT.pdf](http://new.bibus.cz/pdf/Comat/Kompozitni_materialy_COMAT.pdf)
- [7] A. BAREŠ, Richard. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY. Praha: Nakladatelství technické literatury, N. P, 1988. ISBN 04-734-88.
- [8] BLAŤEK, Rostislav. TECHNOLOGICKÝ PROJEKT PROVOZU PRO MECHANICKÉ ZPRACOVÁNÍ VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ [online]. Zlín, 2006 [cit. 2012-02-24]. Dostupné z: [http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/2140/bla%C5%BEEk\\_2006\\_b.pdf?sequence=1](http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/2140/bla%C5%BEEk_2006_b.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. Imrich Lukovics, Csc.
- [9] VRBKA, Jan. MECHANIKA KOMPOZITŮ [online]. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008[cit. 2012-02-22]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=52474](http://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=52474)
- [10] ČERVINKA, Josef. *Geopolymery - využití pro restaurování kamene a souvisejících materiálů* [online]. Fakulta restaurování, 2008 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: [http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/29938/1/CervinkaJ\\_Geopolymery\\_RT\\_2008.pdf](http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/29938/1/CervinkaJ_Geopolymery_RT_2008.pdf). Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Renata Tišlová, Ing. Karol Bayer.
- [11] KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V.: Úvod do studia materiálů. 1. vyd. 2005.,s.191,Vydavatelství VŠCHT Praha , ISBN 80-7080-568-4
- [12] CIULLO, P. A.: Industrial Minerals and Their Uses - A handbook and Formulary. William Andrew Publishing/notes, 1996, ISBN 978-0-8155-1808-2
- [13] *Mikromechanika materiálu* [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/>. Přednáška na téma Kompozity.

- [14] Janovec,J.,Cejp,J.,Steidl,J. Perspektivní materiály. ČVUT v Praze, 2008.

*Další odborná literatura:*

- DAVIDOVITS, J. Geopolymer Chemistry and Application, ed. Second. 2008: Institute Géopolymer – France.587 .
- DAVIDOVITS, J. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. Geopolymer 2002 Conference, October 28 – 29, 2002, Melbourne, Australia.
- HUNG,T.D. Geopolymerní kompozitní systémy na bázi termální siliky: studie postupu přípravy a mechanických vlastností. Disertační práce, TU v Liberci 2010.
- XIEM,N.T. Potenciální využití geopolymerních materiálů v oblasti zpracování odpadů. Disertační práce, TU v Liberci 2011.